

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta materiálově-technologická



## DISERTAČNÍ PRÁCE

**Design a modelování kompozitních struktur pro medicínské aplikace**

***Design and Modeling of Composite Structures for Medical Applications***

Ing. Martina KALOVÁ

Školitel: doc. Ing. Soňa Rusnáková, PhD.

Ostrava, 2020

### **Prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracovala samostatně a na základě uvedených literárních odkazů, které v práci řádně cituji.

V Ostravě, dne: 10.2.2020



.....

Ing. Martina Kalová

## **Poděkování**

Přednostně bych ráda poděkovala své školitelce, doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D., za odbornou pomoc při vypracování této práce, za ochotu, vstřícnost, trpělivost a také za její přátelský a inspirativní přístup. Mé poděkování patří taktéž prof. Ing. Zdeňkovi Jonštovi, CSc. za odborné konzultace, podporu a pomoc během studia, a také děkuji doc. Ing. Jakubovi Javoříkovi, Ph.D. za možnost konzultací v rámci praktické části.

Dále mé poděkování patří lázním Sanatoria Klimkovice, konkrétně Ivetě Nogové, za její cenné informace, čas, ochotu a vždy skvělý přístup při konzultacích ohledně kompenzačních pomůcek a rehabilitace.

Poděkování patří i Ing. Filipovi Tomancovi, Ph.D. za pomoc s výkresovou dokumentací a za jeho odborné rady. V neposlední řadě chci poděkovat celému obsazení laboratoře integrity konstrukcí a designu materiálu (SIMD), Centru pokročilých inovačních technologií (CPIT) a laboratoři ProtoLab, kteří mají velký podíl na experimentální části a vzniku celé práce.

Můj největší dík patří rodině za bezmeznou podporu, zejména mému partnerovi a dětem za neuvěřitelnou trpělivost v tomto náročném období.

## ANOTACE

Tato dizertační práce se zabývá studiem polymerních kompozitních materiálů a jejich využitím v oblasti medicíny.

Teoretická část práce je věnována problematice polymerních vláknových kompozitů, využitím kompozitních materiálů v medicíně, a také návrhem a modelováním výrobků pomocí výpočetní techniky.

Experimentální část se zabývá aplikací dvou druhů vláknových materiálů ve formě vhodné pro dvě různé konvenční zpracovatelské technologie výroby nesouosých dutých kompozitních profilů. Jedná se o prepregy (předem pryskyřicí nasycená vláknová výztuž) s uhlíkovými a hybridními uhlík/aramidovými vlákny pro technologii lisování ve formě a o tkaniny taktéž uhlíkovou a hybridní uhlík/aramidovou pro technologii ruční laminace. Praktická část je navíc doplněna o nekonvenční metodu výroby kompozitních materiálů, a to pomocí 3D tisku kompozitu z uhlíkových vláken.

Cílem práce je vyhodnotit výsledky mechanického zkoušení prototypu na vzpěr, porovnat je s výsledky softwarové analýzy pomocí metody konečných prvků a ověřit tak, zdali výsledky obou provedených metodických postupů korelují.

**Klíčová slova:** polymerní kompozitní materiály, uhlíková vlákna, hybridní vláknová výztuž, duté profily, lisování prepregů, ruční laminace, 3D tisk, metoda konečných prvků.



## **ANNOTATION**

This dissertation thesis is dedicated to the study of fiber composite materials and their use in the area of medicine.

The theoretical part is attached to the problem of polymer fiber composites, the use of composite materials in medicine and also includes a part of product design and modeling using computer technology.

The experimental part deals with the application of two kinds of fiber materials in a suitable form for two different conventional technologies for manufacturing non-aligned composite hollow profiles. These are prepregs (resin pre-impregnated fiber reinforcement) with carbon and hybrid carbon/aramid fibers for prepreg compression molding technology and carbon fabrics as well and hybrid carbon/aramid for hand lay-up technology. The experimental part is completed by the unconventional method of manufacturing composite materials using 3D carbon fiber printing.

The aim of the work is to evaluate the results of mechanical testing, compare them with the results of software analysis using the finite element method and verify whether the results of both performed methods correlate.

Keywords: polymer composite materials, carbon fibers, hybrid fabric, hollow profiles, prepreg compression molding, hand lay-up, 3D printing, finite element method.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	Milimetr
cm	Centimetr
$\mu\text{m}$	Mikrometr
m	metr
kg	Kilogram
mg	miligram
g	Gram
J	Joule
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
N	Newton
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň Celsius
K	Stupně Kelvina
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
$\sigma$	Pevnost v tahu [MPa]
$E_t$	Modul pružnosti ve směru vláken [GPa]
$E_l$	Modul pružnosti v příčném směru vláken [GPa]
$\sigma_t$	Pevnost v tahu jednosměrných vláken [MPa]
$\sigma_l$	Pevnost v tahu v příčném směru vláken [MPa]
FRP	Fibre-reinforced Plastic (Vlákný vyztužené polymery)
HM	High Modulus (vysokomodulová)
HS	High Strength (vysokopevnostní)
UD	Unidirectional (jednosměrné)
$\varepsilon$	Deformace (%)
$\rho$	Hustota
$\sigma / \rho$	Specifická pevnost
$E / \rho$	Specifický modul
$\Theta$	Kontaktní úhel ( $^{\circ}$ )
$\gamma_{tp}$	Povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\gamma_{tk}$	Povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a kapalně fáze [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$\gamma_{kp}$	Povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

PEEK	Polyetereterketon
HA	hydroxyapatit
UHMWPE	Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (vysokomolekulární polyethylen)
CF	Carbon Fibre (uhlíková vlákna)
GF	Glass Fibre (skleněná vlákna)
PMMA	Polymethylmetakrylát
PHB	Polyhydroxybutyrát
PTFE	Polytetrafluorethylen
PET	Polyethylentereftalát
PU	Polyuretan
HDPE	vysoko hustotní polyethylen
PS	Polystyren
PGA	kys. polyglykolová
SAE	Specifc Absorption Energy (specifická absorpce energie) [ $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ]
W	Množství pohlcené energie [J]
V	Objem zdeformovaného materiálu [ $\text{cm}^3$ ]
$\rho$	Hustota zdeformovaného materiálu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
MKP	Metoda konečných prvků
SEM	Scanning Electron Microscopy (skenovací elektronový mikroskop)
PCM	Prepreg compressing molding (lisování prepregů pod tlakem)
RVE	Representative Volume Element (reprezentativní ojemový element)
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAE	Computer Aided Engineering
FEA	Finit Element Analysis
FEM	Finit Element Method (metoda konečných prvků)

RUC	Representative Unit Cell (Jednotková reprezentativní buňka)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (uhlíkovými vlákny vyztužené polymery)
STL	Stereolitografie
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
ABS	Akrylbutadienstyren
PLA	Polyactic Acid
PEG	polyethylenglykol
PLGA	kyselina poly-mléčná-glykolová
PVA	polyvinylalkohol
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (přímé kovové laserové slinování)
HIPS	houževnatý polystyren
$\bar{x}$	aritmetický průměr
N	počet měření
x	i-tá hodnota měřené veličiny
s	směrodatná odchylka
v	variační koeficient [%]
$F_{\max}$	maximální síla [N]
$F_{\text{krit}}$	kritická síla [N]
RL	ruční laminace
SiC	karbid křemíku
Au-Pd	zlato-paladium
USD	americký dolar

# OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>2 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S VLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ.....</b>	<b>6</b>
2.1 KLASIFIKACE POLYMERNÍCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ .....	6
2.2 VLASTNOSTI POLYMERNÍCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ.....	7
2.2.1 Synergismus .....	7
2.2.2 Anizotropie .....	8
2.2.3 Specifické vlastnosti .....	10
2.3 VLÁKNOVÁ VÝZTUŽ .....	11
2.3.1 Uhlíková vlákna .....	13
2.3.2 Aramidová vlákna .....	13
2.3.3 Skleněná vlákna.....	14
2.3.4 Hybridní vláknová výztuž .....	15
2.4 FORMY VLÁKEN.....	17
2.4.1 Tkaniny.....	18
2.4.2 Prepregy.....	18
2.5 POLYMERNÍ MATRICE .....	19
<b>3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V MEDICÍNĚ .....</b>	<b>22</b>
3.1 POŽADAVKY NA MATERIÁLY PRO MEDICÍNSKÉ APLIKACE .....	22
3.2 VYUŽITÍ KOMPOZITŮ V JEDNOTLIVÝCH OBLASTECH MEDICÍNY .....	23
3.2.1 Fixace zlomenin .....	23
3.2.2 Implantáty .....	24
3.3 LOKOMOČNÍ POMŮCKY .....	25
3.3.1 Hole a berle.....	25
3.3.2 Chodítka a vozíky .....	26
3.3.3 Protetika a ortézy .....	27
<b>4 DESIGN POLYMERNÍCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ .....</b>	<b>28</b>
4.1 ASPEKTY NÁVRHU KOMPOZITNÍCH SYSTÉMU .....	28
4.2 METODIKA NÁVRHU KOMPOZITNÍ KONSTRUKCE.....	29
<b>5 ÚVOD DO MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH STRUKTUR.....</b>	<b>32</b>
5.1 SYSTÉMY POČÍTAČOVÉHO MODELOVÁNÍ .....	32
5.2 SOUČASNÝ STAV MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH STRUKTUR.....	33
<b>6 3D TISK.....</b>	<b>42</b>
6.1 3D TISK KOMPOZITNÍCH STRUKTUR .....	43
6.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM) .....	43
6.2 SOUČASNÉ TRENDY 3D TISKU POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ V MEDICÍNĚ .....	45
<b>7 TECHNOLOGIE VÝROBY DUTÝCH KOMPOZITNÍCH DÍLŮ .....</b>	<b>49</b>
7.1 PULTRUZE (PULTRUSION) .....	49
7.2 NAVÍJENÍ (WINDING).....	50
7.3 LISOVÁNÍ PREPREGŮ (PCM - PREPREG COMPRESSION MOLDING).....	51
7.4 RUČNÍ LAMINACE (HAND LAY-UP) .....	52
<b>8 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>54</b>

<b>9 INOVACE LOKOMOČNÍ POMŮCKY - ČTYŘBODOVÁ HOLE .....</b>	<b>56</b>
9.1 REŠERŠE PATENTŮ A UŽITNÝCH VZORŮ HOLE .....	57
9.2 NÁVRH A VÝROBA DUTÝCH KOMPOZITNÍCH PROFILŮ .....	60
9.2.1 <i>Návrh a výroba jader pro duté kompozitní profily</i> .....	61
9.2.2 <i>3D Tisk jader</i> .....	62
9.2.3 <i>Návrh a výroba formy pro dutý kompozitní profil</i> .....	67
9.2.4 <i>Výroba dutých profilů lisováním prepregů</i> .....	70
9.2.5 <i>Výroba dutých profilů ruční laminací</i> .....	75
9.2.6 <i>Výroba dutých profilů 3D tiskem</i> .....	80
9.2.7 <i>Defekty při výrobě dutých profilů</i> .....	83
<b>10 EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČETNÍ ANALÝZA DUTÝCH KOMPOZITNÍCH PROFILŮ .....</b>	<b>86</b>
10.1 MECHANICKÉ ZKOUŠENÍ DUTÝCH KOMPOZITNÍCH PROFILŮ NA VZPĚR .....	86
10.1.1 <i>Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr dutých kompozitních profilů</i> .....	89
10.1.2 <i>Statistické vyhodnocení zkoušky na vzpěr dutých kompozitních profilů</i> .....	92
10.2 ANALÝZA DUTÝCH KOMPOZITNÍCH PROFILŮ POMOCÍ MKP .....	94
10.3 SROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH A SIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY NA VZPĚR .....	97
<b>11 ROZBOR MIKROSTRUKTURY KOMPOZITNÍCH PROTOTYPŮ .....</b>	<b>99</b>
11.1 MIKROSTRUKTURA KOMPOZITNÍCH PROFILŮ POMOCÍ METALOGRAFICKÉ ANALÝZY .....	99
11.2 MIKROSTRUKTURA KOMPOZITNÍCH PROFILŮ POMOCÍ ANALÝZY SEM .....	103
<b>12 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>107</b>
12.1 NÁKLADY ZA MATERIÁL NA RUČNĚ VYROBENÉ DUTÉ KOMPOZITNÍ PROFILY .....	107
12.2 NÁKLADY ZA MATERIÁL NA DUTÉ KOMPOZITNÍ PROFILY VYROBENÉ 3D TISKEM .....	109
12.3 SROVNÁNÍ NÁKLADŮ NA VYROBENÝ PROTOTYP .....	110
<b>13 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI .....</b>	<b>111</b>
<b>14 ZÁVĚR .....</b>	<b>112</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>114</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>115</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>119</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>131</b>

# 1 ÚVOD

Formulací pro definici kompozitních materiálů existuje nespočet. Obecně lze ale říci, že kompozit je každý materiálový systém, složený z minimálně dvou fází, z nichž alespoň jedna je pevná. Systém má makroskopicky rozeznatelné rozhraní mezi fázemi a dosahuje vlastností, kterých nemůže být dosaženo kteroukoliv složkou samostatně ani jejich prostou sumací [1].

Myšlenka vzájemného kombinování materiálů do jednoho celku s cílem vytvořit nový materiál je již velmi stará. Na kouzlo kompozitního principu přišlo lidstvo už v dávné minulosti, kdy jim přestaly stačit do té doby dostupné materiály. Lidé, obklopeni přírodou, ve které se inspirovali, začali vytvářet první umělé kompozity jako např. cihly vyztužené slámou, japonské meče nebo mongolské luky [2].

Vývoj syntetických materiálů byl důsledek stále prohlubujícího se vyčerpávání přírodních zdrojů a nerostných surovin. Výroba plastů začala v 19. století spíše jako výsledek pokusů a náhod, ale dnes jsou těmito materiály nahrazovány a doplňovány ty tradiční, jež mají srovnatelné nebo dokonce lepší vlastnosti než materiály přírodní [2, 3].

Dnes se daří vytvářet kompozity ze všech hlavních tříd organických i anorganických materiálů. Setkat se s nimi lze u běžných věcí (lyže, cyklistická kola, tenisové rakety...) i u náročnějších aplikací pro automobilový, letecký nebo kosmický průmysl [1, 2, 4].

Potřeba kompozitních materiálů proniká i do oblasti medicíny, kde se stávají součástí nejrůznějších lékařských aplikací. Ať už se jedná o využití těchto materiálů v oblasti stomatologie (zubní náhrady), chirurgie (vnitřní a vnější fixace, protetika) nebo pro výrobu kompenzačních a sportovně-kompenzačních pomůcek, existuje nespočet materiálů a jejich vzájemných kombinací, díky kterým je možné dle zadaných požadavků vytvořit materiál přímo na míru konkrétnímu použití.

Nedílnou součástí oblasti zdravotnictví jsou i tzv. lokomoční pomůcky (hole, berle, vozíky, ...), kterých využívá velké procento populace. Ať už z důvodu nemoci, operací, vrozených vad nebo stárnutí, požadavky vychází zejména od pacientů, pro které jsou tyto pohybové prostředky krátkodobou nebo dlouhodobou součástí každodenního života.

Se zvyšujícími se nároky na lékařskou péči rostou i požadavky na inovaci a zkvalitnění lékařských potřeb (pomůcky, nástroje, implantáty, ...). Co se týče např. holí a berlí, je snaha zkomponovat takový produkt, který by splňoval požadavky uživatelů, jako jsou požadavky na snížení hmotnosti, odolnost, komfort, odhlučnění, jednodušší manipulaci a také moderní vzhled. Právě i vzhled hraje roli při používání pomůcek tohoto typu, kdy většina pacientů má

při používání kompenzačních pomůcek pocity méněcennosti a obavy z reakce okolí. Skoro třetina pacientů z těchto důvodů hole a berle odkládá a odmítá dále používat.

Jednou z takových hojně využívaných kompenzačních pomůcek, které jsou velmi osvědčené u fyzioterapeutických postupů je čtyřbodová hole. Tato ortopedická pomůcka se za 30 let téměř nezměnila. Vyrábí se stále z duralu a je doplněna o méně kvalitní plasty a pryžové komponenty. Dnešním požadavkům na únosnost, nastavitelnost, stabilitu a modernější vzhled přestává vyhovovat. Proto se stalo výzvou inovovat stávající čtyřbodovou holi s využitím kompozitních komponent tak, aby splnila očekávání jak fyzioterapeutického personálu, tak pacientů.



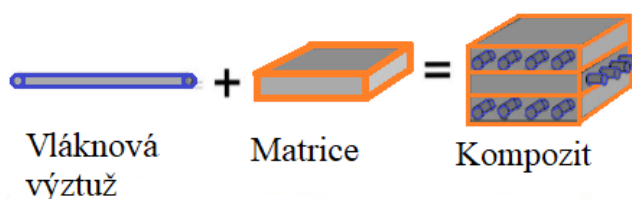
# TEORETICKÁ ČÁST

## 2 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S VLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ

Obecně řečeno, kompozitní materiál (kompozit) je heterogenní systém, který vzniká mísením dvou a více složek. Mnoho kompozitních materiálů se skládá pouze ze dvou fází, z nichž jedna se nazývá matrice, která je spojitá a obklopuje druhou fázi, často nazývanou vyztužující fáze, které musí být nejméně 5 %, aby mohl být materiál zařazen mezi kompozity. Mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti výztuže a matrice se musí významně lišit. V případě polymerních kompozitů je fázová matrice představovaná polymerním materiálem, nejčastěji ve formě reaktoplastických nebo termoplastických pryskyřic a druhá fáze – plnivo, je složeno z anorganických nebo organických částic či vláken [5, 6].

Kompozit je v tomto kontextu vícefázový materiál, který je uměle vytvořen, na rozdíl od toho, který se vyskytuje v přírodě. Kromě toho musí být jednotlivé fáze chemicky odlišné a odděleny odlišným rozhraním. Z tohoto důvodu nemůže být velká část kovových slitin a keramiky, jež vznikly v důsledku přírodních jevů, zařazeny do skupiny kompozitních materiálů [5, 7].

Polymerní vláknové kompozity patří mezi nejstarší a nejrozsáhlejší skupinu kompozitních materiálů. Jejich průmyslová výroba začala ve 30. letech 20. století, kdy se využívaly hlavně pro letecký průmysl. Vlákná vyztužená plasty (FRP – Fiber Reinforced Plastics), jejichž schématická ukázka je na obr. 1, mají velmi všestranné využití, od jednoduchých technických aplikací pro domácnost až po náročné konstrukce pro letectví a kosmonautiku, od jednoduché ruční výroby až po vysoce pokročilé technologické postupy [8, 9].



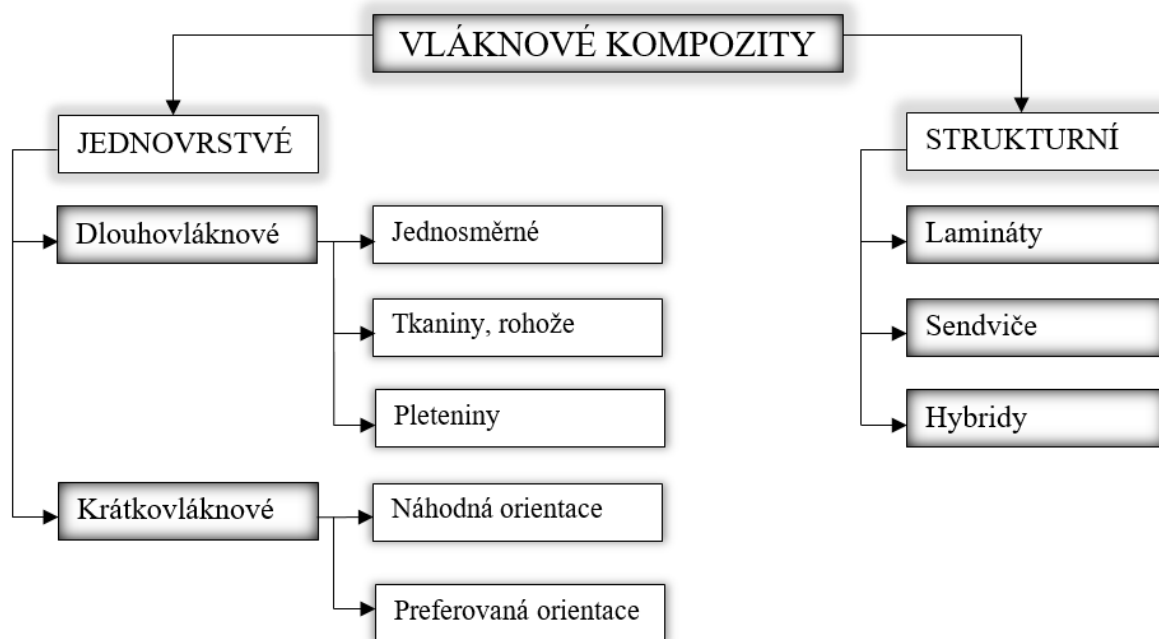
Obr. 1: Skladba kompozitního materiálu s vláknovou výztuží [10].

### 2.1 Klasifikace polymerních vláknových kompozitů

Nejčastěji se polymerní vláknové kompozitní materiály klasifikují podle typu matrice a podle typu nebo druhu výztuže.

Podle typu matrice se polymerní kompozity člení na termoplasty, reaktoplasty nebo elastomery. Podle typu plniva se polymerní kompozity řadí do dvou skupin; kompozity s anorganickým plnivem (oxidy, hydroxidy, soli, silikáty, kovy, uhlíková a skleněná vlákna) a na kompozity

s organickými plnivy, což zahrnuje celulosová, aromatická polyamidová a polyesterová vlákna. Klasifikace polymerních vláknových kompozitů je znázorněna na obr. 2 [9, 11].



Obr. 2: Schematické rozdělení vláknových kompozitů.

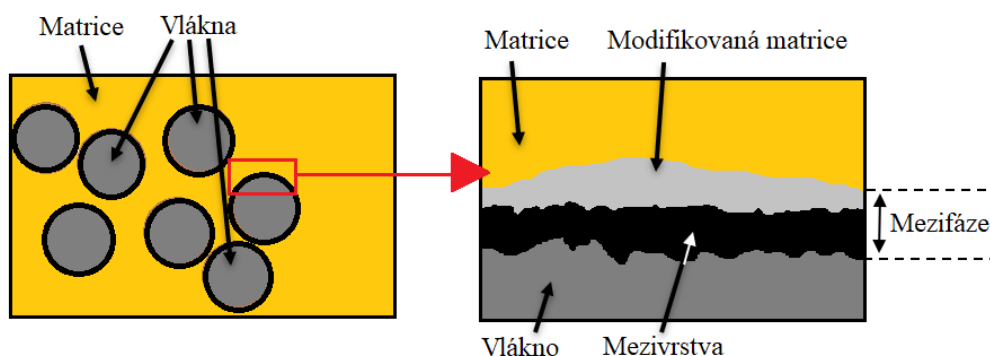
## 2.2 Vlastnosti polymerních vláknových kompozitů

Vlastnosti kompozitů jsou funkcí vlastností jednotlivých fází, jejich relativních množství a geometrie dispergované fáze. "Geometrie dispergované fáze" v tomto kontextu znamená tvar částic a velikost částic, jejich rozložení a orientace. Technologicky nejdůležitější kompozity jsou ty, ve kterých je dispergovaná fáze ve formě vlákna – vlákny vyztužené plasty [5].

### 2.2.1 Synergismus

Podstatou tzv. synergetického efektu je vytváření „nového“ materiálu s významně lepšími vlastnostmi, než by došlo pouhým poměrným sečtením vlastností jednotlivých složek tvořících kompozit, tj. při kombinování různých druhů matrice a výztuže. Matematicky lze synergismus vyjádřit „chybnou“ rovnicí  $1 + 2 = 5$ . Proto je důležité, aby u materiálových charakteristik, na které se klade největší důraz, fungoval synergetický efekt co nejsilněji. To se děje v případě, kdy matrice a vlákna mohou být samostatně velmi křehká, ale spojením do kompozitu dosáhne materiál určité lomové houževnatosti, tj. odolnosti proti náhlému křehkému porušení. Trhlina, která se šíří na směr vláken se zabrzdí na mezifázovém rozhraní matrice-vlákno a trhlina najednou změní směr podél tohoto rozhraní [6, 12, 13].

Mezifázové rozhraní je oblast materiálu mezi povrchem vlákna a matricí. Složení, struktura a vlastnosti mezifáze mohou být odlišné napříč celou oblastí a může být jiná, než je složení, struktura a vlastnosti obou složek kompozitu. Mezifázového rozhraní je schematicky znázorněno na obr. 3. [14]



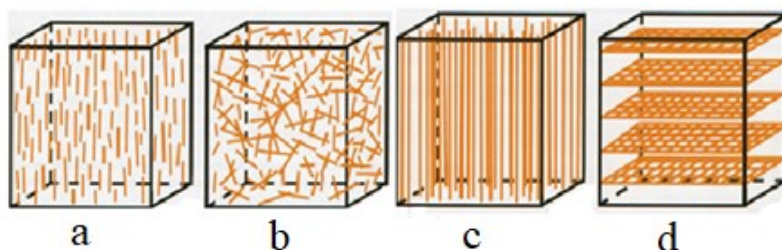
Obr. 3: Schématické zobrazení mezifáze kompozitu.

Principem mezifáze je jak přenos napětí z matrice na vlákna, tak také ochrana vláken před poškozením vlivem prostředí. Přenos napětí závisí na síle mezifáze i na mechanických vlastnostech vlákna, matrice a mezifáze. Mezifáze může být řízená nebo neřízená. U neřízené mezifáze je kompozit vyztužen povrchově neupravenými vlákny. Vzniklá mezifáze má stejné složení jako polymerní matrice, ale má jinou fyzikální mikrostrukturu. V některých případech je složité řídit tloušťku a strukturu těchto vrstev. Přitom právě tyto parametry jsou rozhodující z hlediska ovlivňování adheze mezi matricí a výztuží. Adheze neupravených výztuží bývá většinou špatná. Z tohoto důvodu se začala výztuž cíleně povrchově upravovat tenkými mezivrstvami (10–100 nm), které zajišťují lepší smáčení vláken a vazby k výztuži i k matrici jsou tak pevnější. Tento případ je nazýván jako řízená mezifáze [15].

### 2.2.2 Anizotropie

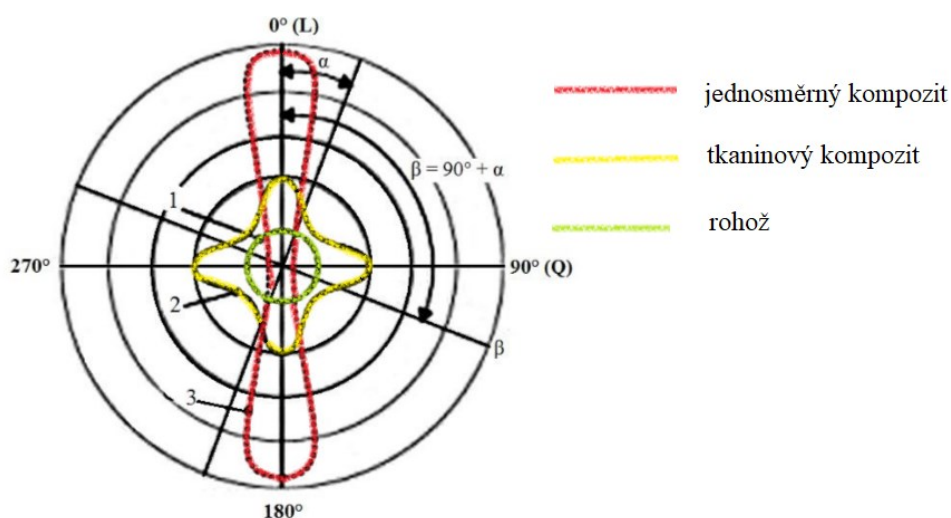
Kompozitní materiály jsou ve svých strukturách složitější než jednofázové jednosložkové materiály, jako je většina kovů, plastů a keramiky, kde jsou vlastnosti ve všech směrech stejné. Dokonce, i když jsou tyto jednosložkové materiály naplněny částicemi, jsou jejich struktury mnohem méně komplikované než u většiny kompozitů, u kterých existuje specifická směrovost. Když je struktura materiálu stejná ve všech směrech, nazývá se izotropní. Protože vlákna ve většině kompozitů nejsou rovnoměrně orientována ve všech směrech, kompozity jsou obecně neizotropní, tedy anizotropní. S anizotropií se lze vyrovnat vhodným uspořádáním, např. lamináty nebo lze anizotropie také vhodně využít (luky, lopatky turbín) [13, 16].

Orientace vláken (obr. 4) je velmi důležitým aspektem, který ovlivňuje vlastnosti kompozitů. Dokáže totiž optimalizovat pevnost a tuhost, odolnost proti únavě, teplotě a vlhkosti. Orientace vláken je také rozhodující z hlediska aplikačních vlastností i z hlediska výběru technologie zpracování, kdy je nutné specifikovat směr namáhání výrobku vzhledem k orientaci vláken [5, 13].



Obr. 4: Možnosti orientace vláken v kompozitních materiálech; a) krátká vlákna uspořádaná v jednom směru, b) krátká vlákna uspořádaná náhodně, c) dlouhá vlákna uspořádaná v jednom směru, d) dlouhá vlákna uspořádaná ve vrstvách [16].

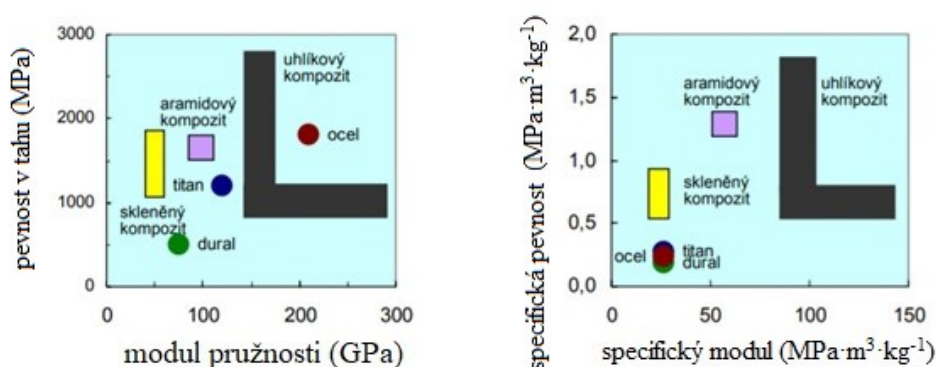
Nejvyšší pevnosti je dosaženo ve směru orientace vláken. V ostatních směrech je pevnost nižší, nejmenší kolmo na směr vláken. Proto u výrobků, které mají být jednosměrně zatíženy, tak je z pevnostního hlediska nejlepší použít jednosměrně vyztužený kompozit. Pro složitější zatížení se používají kompozity složené z více vrstev s různou orientací vláken nebo vyztužené tkaninou. Proto je nutné zohlednit při návrhu kompozitního dílu anizotropní vlastnosti výztužných vláken. Diagram pevnosti v tahu podle orientace vláken v polárních souřadnicích je znázorněn na obr. 5.



Obr. 5: Polární diagram pevnosti v tahu pro laminát (L-podélný/osový směr, Q-kolmý směr) [17].

### 2.2.3 Specifické vlastnosti

Oproti kovovým materiálům jsou polymerní kompozity výhodnější, hlavně co se týče odolnosti proti korozi, nízké hustoty a nízké energetické náročnosti výroby. Unikátní jsou ale hlavně kvůli své vysoké specifické pevnosti, tj. poměru pevnosti v tahu k měrné hmotnosti materiálu. Na obr. 6 si je možné všimnout rozdílu mezi kovovými materiály a kompozitem. Zatímco polymerní kompozit, který je vyztužen uhlíkovými vlákny, má pevnost nižší, než je např. u oceli (obr. 6 vlevo), v případě specifické pevnosti je tomu naopak. Specifická pevnost uhlíkového kompozitu je mnohem vyšší, než dosahují oceli a jiné kovy. (obr. 6 vpravo) [5, 13, 18].



Obr. 6: Srovnání vlastností tradičních a kompozitních materiálů [9].

Obrázky ukazují vztah mezi pevností a tuhostí (modulem pružnosti) u tradičních kovových materiálů a kompozitů. Oblasti vlastností kompozitů jsou vzhledem ke kovům širší, protože lze kombinovat vlákna s různými vlastnostmi, např. u uhlíkových kompozitů lze dle potřeby použít buď vlákna o vysokém modulu pružnosti (HM – High Modulus) nebo vlákna s vysokou pevností (HS – High Strength), resp. jejich kombinaci.

Kromě již zmíněné velké měrné pevnosti a také měrného modulu pružnosti (tj. poměr modulu pružnosti k měrné hmotnosti materiálu) se polymerní vláknové kompozity používají pro dobrou chemickou odolnost a korozivzdornost, dobré dielektrické vlastnosti a elektrickou nevodivost (ta se týká jen skleněných, křemenných nebo polymerních vláken) nebo dobrou propustnost pro rentgenové záření (uhlíková vlákna). Kompozitní materiály se stále častěji cíleně vyrábí i díky požadavkům, které jsou na rozdíl od tradičních materiálů schopny jednoduše splnit. Požadavky zahrnují např. zvýšení pevnosti a tuhosti a jejich udržení při vysoké teplotě, zvýšení houževnatosti (odstranění křehkosti), redukce hmotnosti, snížení teplotní roztažnosti, zvýšení korozní nebo chemické odolnosti, snížení nasákavosti, zvýšení rozměrové stability, zvýšení

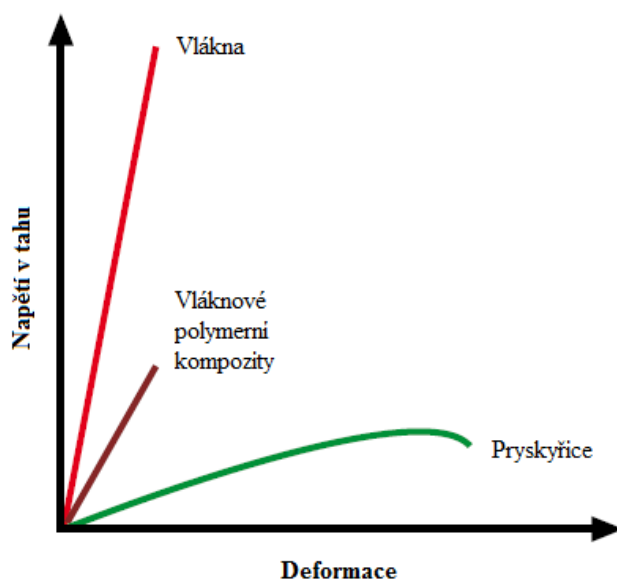
teplotní stability (rozšíření teplotního rozsahu použitelnosti), modifikace elektrických vlastností, zvýšení mechanického tlumení (antihlukové a antivibrační materiály), snížení propustnosti pro kapaliny nebo plyny, nižší dopad na životní prostředí nebo snížení ceny [12].

### 2.3 Vláknová výztuž

Vlákna se samostatně v technické praxi téměř nepoužívají. Slouží hlavně jako výztuž pro polymerní matrice, čímž tak zvyšují pevnost a tuhost vzniklého vláknového kompozitu. Matrice a vlákna jsou kombinovány tak, aby výsledný kompozit získal optimální vlastnosti a značnou životnost. Nejdůležitější je, aby pevnost a modul pružnosti vláken byly výrazně vyšší než pevnost a pružnost matrice. Naproti tomu matrice musí dosahovat většího protažení, než je protažení vyztužujících vláken.

Charakteristickým znakem vlákna je, že pevnost v tahu ve směru osy je mnohokrát vyšší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Čím je vlákno užší, tím vyšší je jeho síla. Tento jev je znám jako paradox vláknité struktury. Nejvýraznějšího efektu lze dosáhnout, pokud jsou vlákna uspořádána v jednom směru. Kompozit má v tomto směru vysokou pevnost. Avšak v kolmém směru je jeho síla velmi nízká. Proto jsou kompromisem vlákna tkaná do tkanin, kde pevnost kompozitu je nižší, ale stejná ve všech směrech [6, 19, 20].

Mechanické vlastnosti jednotlivých složek tvořících kompozit je graficky znázorněn na obr. 7 [21].



Obr. 7: Srovnání mechanických vlastností jednotlivých složek kompozitu s kompozitem samotným [21].

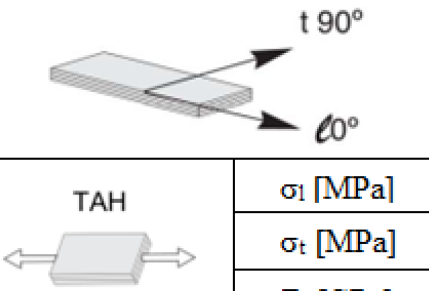
Na přípravu vláknových polymerních kompozitů se používají nejrůznější druhy organických a anorganických vláken. Výběr vláken, jak již bylo zmíněno, závisí na požadovaných vlastnostech budoucí kompozitní aplikace, výrobní technologii a také na míře celkových nákladů.

Přehled vlastností jednotlivých druhů vyztužujících vláken je uveden v Tab. 1 [21].

Tab. 1: Srovnání vlastností vyztužujících vláken [21].

Materiál vláken	Modul pružnosti v tahu $E$ (GPa)	Mez pevnosti v tahu $\sigma_P$ (GPa)	Hustota $\rho$ (g.cm <sup>-3</sup> )	Specifická pevnost ( $\sigma_P/\rho$ )	Specifický modul ( $E/\rho$ )	Max. provozní teplota (°C)
E-sklo	72	3,5	2,6	1,18	27,6	350
S-sklo	85	4,8	2,48	1,94	34,3	300
Uhlíková vl. (HM)	517	1,86	1,96	0,95	264	600
Uhlíková vl. (HS)	295	5,6	1,8	3,11	164	500
Kevlar 29	60	2,7	1,44	1,87	41,6	-
Kevlar 49	130	2,7	1,45	1,86	89,6	-
Borová vl.	440	2,8	2,6	1,08	169,2	2000
Keramika	152	1,72	2,5	0,7	60,8	1200

Avšak jak už bylo zmíněno, vlákna se samostatně nepoužívají. Rozdíly pevnosti a modulu pružnosti pro jednosměrně vyztužené kompozity a kompozity vyztužené tkaninou jsou patrné z obr. 8 na příkladu kompozitu s uhlíkovými vlákny.

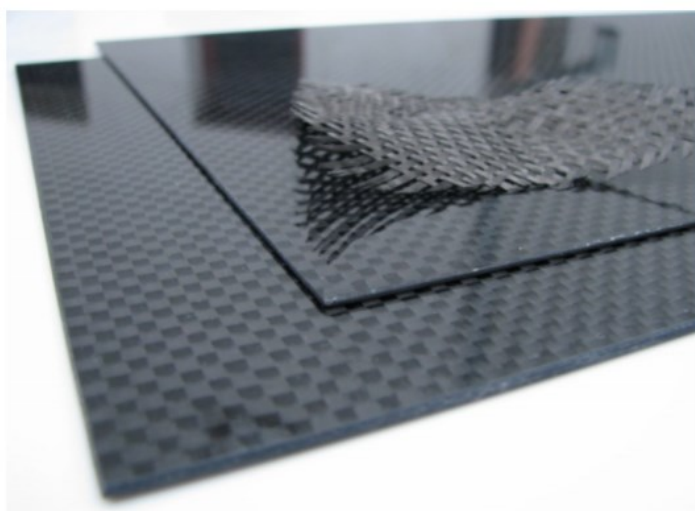
Způsob namáhání a měřené veličiny		Vlákno			
		HS uhlíkové vlákno		IM uhlíkové vlákno	
		UD	tkanina	UD	tkanina
	$\sigma_l$ [MPa]	2000	800	2400	900
	$\sigma_t$ [MPa]	80	750	80	850
	$E_l$ [GPa]	130	70	170	90
	$E_t$ [GPa]	9	65	9	90

Obr. 8: Srovnání vlastností jednosměrně a tkaninou vyztuženého kompozitu s uhlíkovými vlákny [22].



### 2.3.1 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna patří mezi nejpevnější a také nejdražší vlákna používaná při výrobě polymerních kompozitů. Průměry uhlíkových vláken se pohybují od 5  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ . Jejich pevnost je několikanásobně vyšší než pevnost nejlepších ocelí, mají vysoký modul pružnosti, výbornou tepelnou odolnost a nízkou měrnou hmotnost. Stejně jako aramidová vlákna mají uhlíková vlákna také negativní koeficient lineární tepelné roztažnosti a v důsledku toho se se zvyšující teplotou zkracují. Určité omezení uhlíkových vláken spočívá v tom, že jsou v normálním stavu křehká a během výroby se mohou rozpadat. Z tohoto důvodu se používají zejména jako tkaninová výztuž (obr. 9) pro kompozitní materiály.



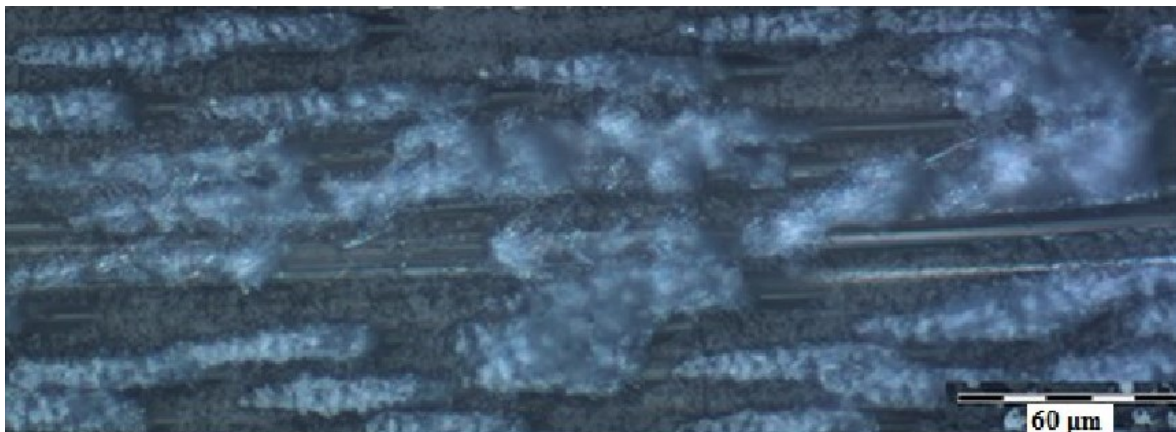
Obr. 9: Uhlíková tkanina a výsledný uhlíkový kompozit [1].

Vlákna jsou kombinována s různými typy polymerních matric. Pak vzniká materiál s jedinečnými vlastnostmi. Dynamické vlastnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny jsou lepší než u jiných materiálů. V minulosti byla tato vlákna používána v leteckém průmyslu. Postupně byly kompozity zavedeny a aplikovány do automobilového, sportovního a spotřebního průmyslu. Navzdory vynikajícím vlastnostem a několikanásobnému poklesu ceny je využití uhlíkových vláken při výrobě polymerních kompozitů stále nižší než např. u skleněných vláken [4, 5, 18].

### 2.3.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podél osy vláken. Přínosem je jejich vysoká pevnost, tuhost a jejich nízká hustota. Patří mezi nejlehčí vyztužující vlákna. Jsou také charakterizovány silnou rázovou houževnatostí a tlumením vibrací, což je důsledek schopnosti aramidových vláken se při

deformaci sbalovat a vytvářet chomáče. Mikrostruktura porušených aramidových vláken pomocí optického mikroskopu je ukázána na obr. 10.



Obr. 10: Mikrostruktura podélných aramidových vláken po deformaci [2].

Bohužel aramid je citlivý na vlhkost a UV záření, kdy se jeho pevnost snižuje. Aramidová vlákna mohou být zpracována se všemi druhy pryskyřic. V laminátu se pak využívá až 70 % jejich pevnosti. Základní vlákna mají průměr 10-13  $\mu\text{m}$ . Používají se ve formě rovingu nebo tkanin, ať už samotně nebo jako kombinace vláken, tj. hybridních kompozitů [9, 12, 19].

### 2.3.3 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou jedním z nejpoužívanějších a finančně nejdostupnějších vyztužujícím materiálem pro výrobu kompozitních materiálů. Po smíchání skleněných vláken (kontinuálních, částicových) s polymerní matricí pak vzniká sklolaminát. Tento typ kompozitu je vyráběn v největším objemu ve srovnání s jinými vlákny. Průměr skleněných vláken se pohybuje mezi 3 a 20  $\mu\text{m}$ . Podle složení jsou nejběžnějšími typy skla E-sklo a S-sklo. Skleněná vlákna (obr. 11) mají vysoké hodnoty pevnosti v tahu a modulu pružnosti.

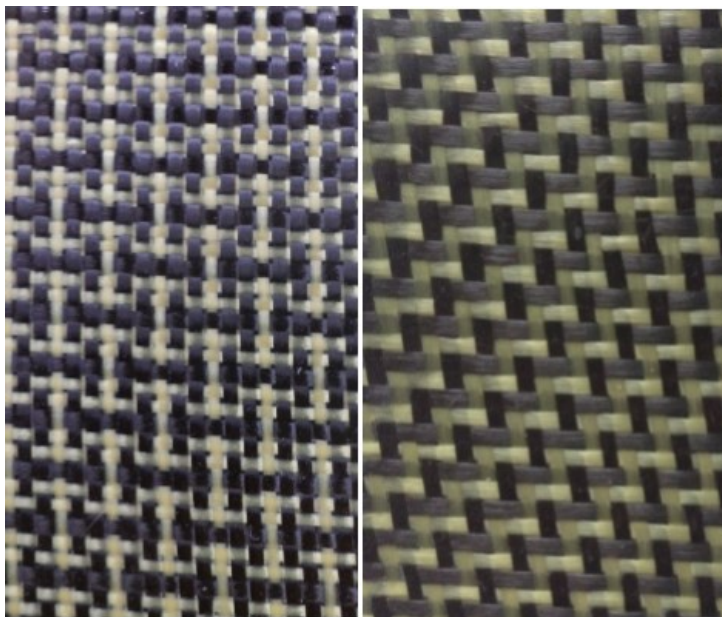


Obr. 11: Tkanina ze skleněných vláken [23].

Dalšími výhodami tohoto materiálu jsou nehořlavost nebo výborné izolační (elektrické, zvukové i tepelné) vlastnosti. I přestože mají tato vlákna celkem vysokou pevnost, nevykazují takovou tuhost, jaká je nezbytná pro některé aplikace (jako konstrukční prvky pro letadla a mosty). Většina materiálů ze skleněných vláken je omezena na provozní teploty pod 200 ° C. Aplikace sklolaminát nachází především ve stavebním a automobilovém průmyslu, pro výrobu potrubí nebo skladovacích kontejnerů [5, 16].

#### 2.3.4 Hybridní vláknová výztuž

Ve většině případů jsou vláknité kompozity tvořeny pouze jediným typem vláken, jako jsou např. vlákna skleněná, uhlíková nebo aramidová. Každý typ vláken má svá vlastní omezení, pokud jde o mechanické vlastnosti, náklady a další vlastnosti materiálů. Tato omezení lze obejít použitím kombinace dvou nebo více typů vláken ve stejné matrici. Použitím dvou nebo více různých typů výztuží spojených stejnou matricí se nazývá hybridizace a výsledný produkt se nazývá hybridní kompozit. Výborné je například spojení uhlíkových a aramidových vláken, jako na obr. 12.



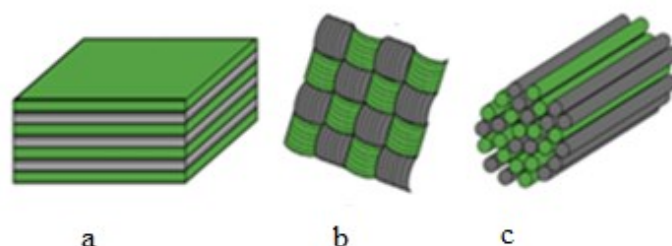
Obr. 12: Hybridní výztuž s plátňovou vazbou (vlevo) a keprovou vazbou (vpravo).

Spojením těchto dvou typů vláken dochází ke kompenzaci nevýhod jednoho vlákna výhodami druhého vlákna a naopak. Z Tab. 2, kde je uveden přehled vlastností aramidových, uhlíkových a skleněných vláken, lze usoudit, že tato vlákna se co do vlastností navzájem doplňují.

Tab. 2: Přehled a srovnání vlastností aramidových, uhlíkových a skelných vláken [8].

Vlastnosti	Vlákna		
	Aramidová	Uhlíková	Skelná
Hustota	++	+	+/-
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
Modul pružnosti	+	++	-
Mez pevnosti v tlaku	-	+	+
Rázová houževnatost	+	-	+
Tlumení	+	-	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	++	+
Dielektrické vlastnosti	++	-	++
Adheze, přilnavost	-	+	++
Nasákavost	-	+	+
Cena	+/-	-	++

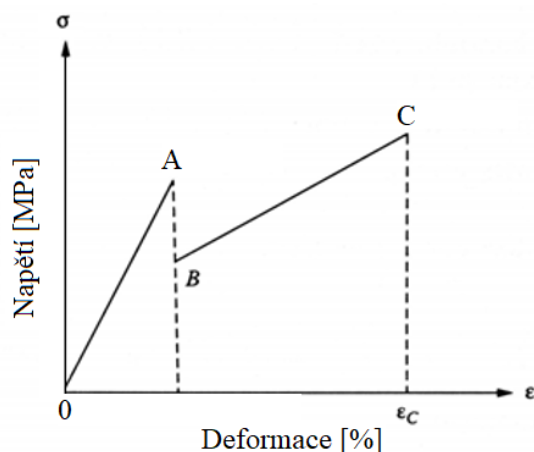
Vlákna hybridního kompozitu lze kombinovat v mnoha různých konfiguracích. Tři základní konfigurace jsou znázorněny na obr. 13.



Obr. 13: Jednotlivé typy hybridizace [24, 25].

Obr. 9a ukazuje, že vrstvy ze dvou typů vláken jsou naskládány na sobě. Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější způsob výroby hybridních kompozitů. Další konfigurací je smíchání obou typů vláken v rámci jedné laminy, kde se vlákna liší v osnově a útku, jak je znázorněno na obr. 9b. Další možností hybridizace je propojení dvou typů vláken v rámci jednoho svazku (9c) [24, 25].

Hybridizace je velmi atraktivní, protože umožňuje relativně snadný návrh kompozitního materiálu s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Poskytuje kombinaci často velmi specifických, a také protichůdných požadavků na materiálové vlastnosti. Hybridní účinek je graficky znázorněn na obr. 14 [21].

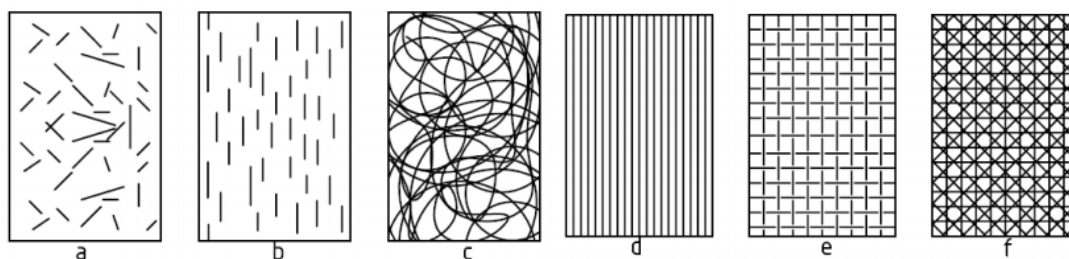


Obr. 14: Princip hybridního účinku [21].

Obrázek znázorňuje idealizovanou křivku napět'ového zatížení dvou vláknových systémů. Počáteční sklon OA udává počáteční modul a sklon BC udává konečný modul. Pád AB v křivce je způsoben poruchou prvního vláknového systému při deformaci  $\epsilon_a$ . Druhý vláknitý systém pokračuje v zatížení, dokud nedojde k poslednímu zlomení při deformaci  $\epsilon_c$  [21].

## 2.4 Formy vláken

Elementární vlákna se vkládají do polymerní matrice nejčastěji ve formě rovingů, tkanin nebo netkaných rohoží. Rozdíly jsou v uložení vláken, typu jejich křížení nebo jejich hustotě. Jednotlivé typy uspořádání vláknové výztuže jsou uvedeny na obr. 15 [5, 11].

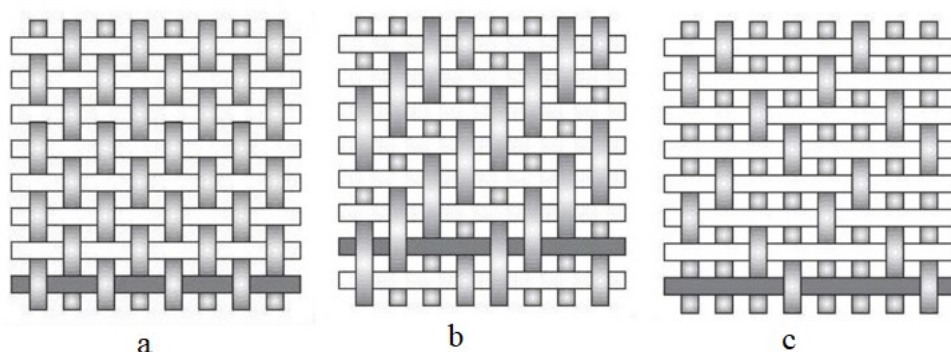


Obr. 15: Příklady formy vláken; a) neusměrněná krátká vlákna, b) usměrněná krátká vlákna, c) rohož, d) jednosměrný roving, e) tkanina, f) víceosý roving (multiaxiální výztuž) [26].



### 2.4.1 Tkaniny

Tkaniny, plošné vláknové polotovary, jsou na rozdíl od jednosměrně orientované výztuže lépe zpracovatelné. Vlákná nebo rovingy se ukládají pravoúhle v útku a osnově. Různou skladbou vláken útku a osnově pak vznikají jednosměrné, směsné nebo hybridní tkaniny. Tkaním zvlněné uložení vláken sice ztrácí na mechanických vlastnostech, avšak výztuž působí v obou směrech. Tkaniny jsou určeny především pro kontaktní laminování. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří několik typů vazeb. Tři nejdůležitější vazby plátňová, keprová a saténová jsou názorně zobrazeny na obr. 16.



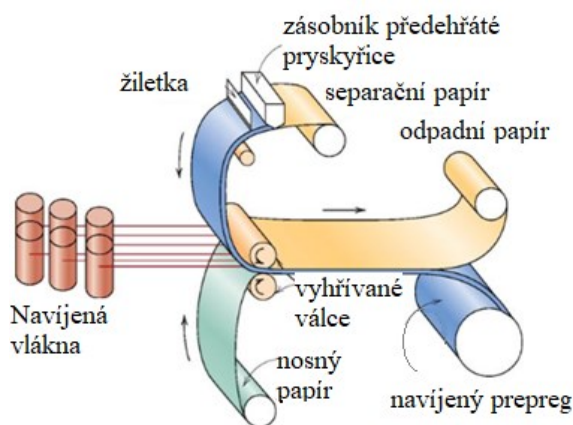
Obr. 16: Vazby tkanin; a) vazba plátňová, b) vazba keprová, c) vazba saténová [27].

Plátňová vazba (obr. 16a) patří mezi nejjednodušší a nejpevnější vazby. Je ale také nejméně poddajná při tvarování. Provázání pramence útku je pravidelně střídáno nad a pod úrovní osnovního pramence, jako šachovnice. Výhodou je dobrá rozměrová stálost a minimální otřep při řezání. Keprová vazba (obr. 16b) je ohebnější a lépe se tvaruje. Menší zvlnění vláken pak způsobuje vyšší pevnost a tuhost laminátu. Vazba má vzhled diagonály. Vzniká překřížením útku minimálně přes dva prameny osnovy, a pak znovu vychází pod jedním nebo více prameny. Saténová vazba (obr. 16c) je také známá jako vazba atlasová pro svůj typický lesklý a hladký povrch. Je vhodná pro prostorové aplikace, protože je nejlépe tvarovatelná, ale také nejméně pevná. Zvlnění vláken je minimální. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12) [16, 18].

### 2.4.2 Prepregy

Prepreg je zkrácený tvar z anglického slova „preimpregnated“, tzn. „předem impregnovaný“. Tato předimpregnovaná a částečně vytvrzená výztuž ve formě tkaniny, kterou je možné vidět na obr. 12, má standardní šířku 1 - 1,2 m. Proces prosycování výztuže matricí se provádí pod kontrolou za reprodukovatelných podmínek na speciálním zařízení. Vzniká tak materiál vysoké kvality, což má vliv na vlastnosti budoucího produktu. Jedinečné vlastnosti prepregu

se získávají při vytvrzování za vysokých teplot a tlaku. Prepregy se z důvodu předimpregnování musí skladovat při nízkých teplotách nejlépe při  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zabrání se tak samovolnému vytvrzování pryskyřice a také se usnadňuje manipulace s tímto na dotek lepivým materiálem. Tloušťka pásů je 1-3 mm a obsah pryskyřice asi 35 %. Jako matrice se používá nejčastěji epoxidová pryskyřice. Předimpregnované lamináty mohou být dodávány v kotoučích a následně skladovány po dobu několika měsíců v mrazících boxech. Prepregy se zpracovávají navíjením, vytlačováním nebo tvářením, kdy je jejich výrobní proces založen na kladení jednotlivých vrstev do otevřené formy. Výroba prepregu je schematicky znázorněna na obr. 17.



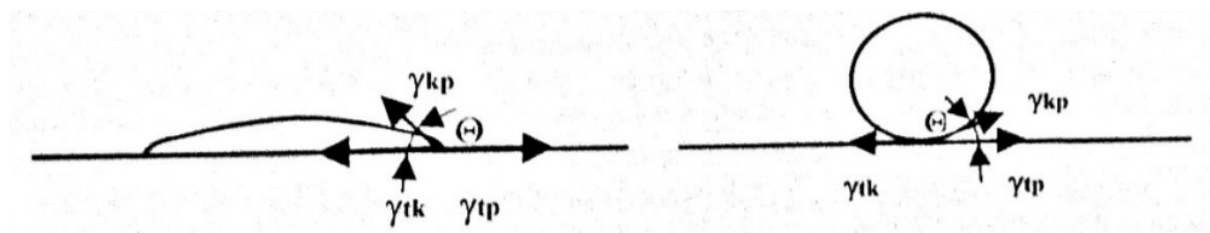
Obr. 17: Proces výroby prepregu [28].

Výroba začíná odvíjením vláken z cívek rovnoběžně na papírový nosič, kde jsou vlákna lisována mezi listy separačního a nosného papíru pomocí vyhřívavých válečků. Separální papír je potažen tenkou vrstvou zahřátého roztoku pryskyřice, aby byla zajištěna důkladná impregnace vláken. Konečným předimpregnovaným produktem je tenká páska, která se skládá z nekonečných a zarovnaných vláken uložených v částečně vytvrzené pryskyřici. Výhodou prepregů je snadná tvarovatelnost, nízká hmotnost, vysoká tuhost, trvanlivost, volnost při návrhu a snížení nákladů na výrobu [5, 8, 16, 28, 29].

## 2.5 Polymerní matrice

Kromě vyztužujících vláken, která jsou primární příčinou pevnosti materiálu, je třeba mít na paměti hlavní úlohu polymerní matrice. Kromě toho, že zprostředkovává přenos sil na výztuž, zabraňuje spojitému šíření trhliny nebo chrání sekundární fázi před vnějším prostředím, určuje i ekonomickou stránku výroby kompozitů. Tyto materiály se používají v nejrůznějších kompozitních aplikacích s ohledem na jejich vlastnosti při pokojové teplotě, snadnost výroby, a také s ohledem na poměrně nízké pořizovací náklady [5, 8, 9].

Při přípravě kompozitu je důležité, aby došlo k dobrému smáčení výztuže, tj. aby při vysoké energii povrchu výztuže měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii. Na obr. 18 je znázorněn tvar kapky na povrchu pevné výztuže [16, 28].



Obr. 18: Znázornění povrchové energie a kontaktního úhlu  $\theta$  u kapky matrice na tuhém povrchu dobré smáčení (vlevo), špatné smáčení (vpravo) [6].

Aby kapalná fáze dobře smáčela podklad, musí být kontaktní úhel (úhel smáčení) velmi malý, tj. když se  $\cos$  blíží 1. Kontaktní úhel je dán vztahem:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{tp} - \gamma_{tk}}{\gamma_{kp}}, \quad (2.1)$$

kde  $\gamma_{tp}$  je povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a plynné fáze,

$\gamma_{tk}$  je povrchová energie napětí na rozhraní tuhé a kapalně fáze a

$\gamma_{kp}$  je povrchová energie rozhraní kapaliny a plynu.

Nejmenší povrchovou energii  $\gamma_{kp}$  mají všeobecně polymerní matrice. Např. epoxidové pryskyřice mají hodnotu  $\gamma_{kp}$  asi  $40 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ . Budou proto dobře smáčet např. hliník s  $\gamma_{kp} = 1100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , ale ne vlákna z vysokopevnostního polyethylenu (UHMWPE – Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene) s povrchovou energií  $\gamma_{kp} = 30 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  [6].

Matrice polymerních kompozitů se dělí do dvou základních skupin, tj. na reaktoplasty a termoplasty.

Reaktoplasty jsou používanější matricí, protože jsou kompatibilní téměř se všemi druhy vláken a jsou odolnější vůči vysokým teplotám i creepu. Tyto vlastnosti spočívají v tom, že i po zahřátí zůstávají reaktoplastické matrice v pevném stavu.

Termoplasty naopak při zvyšující se teplotě měknou a po dosažení kritické teploty tečou. Také se hůře zpracovávají kvůli své vysoké viskozitě. Lepší je pro tento typ matrice používat impregnovaná vlákna, což je ale finančně nákladné [8].

Výběr matrice závisí na konstrukčních požadavcích. Každá matrice se vyznačuje nějakou typickou vlastností, např. houževnatost – epoxid a termoplast, teplotní odolnost – fenol



a polyamid, ohnivzdornost – fenol, průstup tepla – polyester, nízká cena – polyester, nejvyšší mechanické vlastnosti – epoxid.

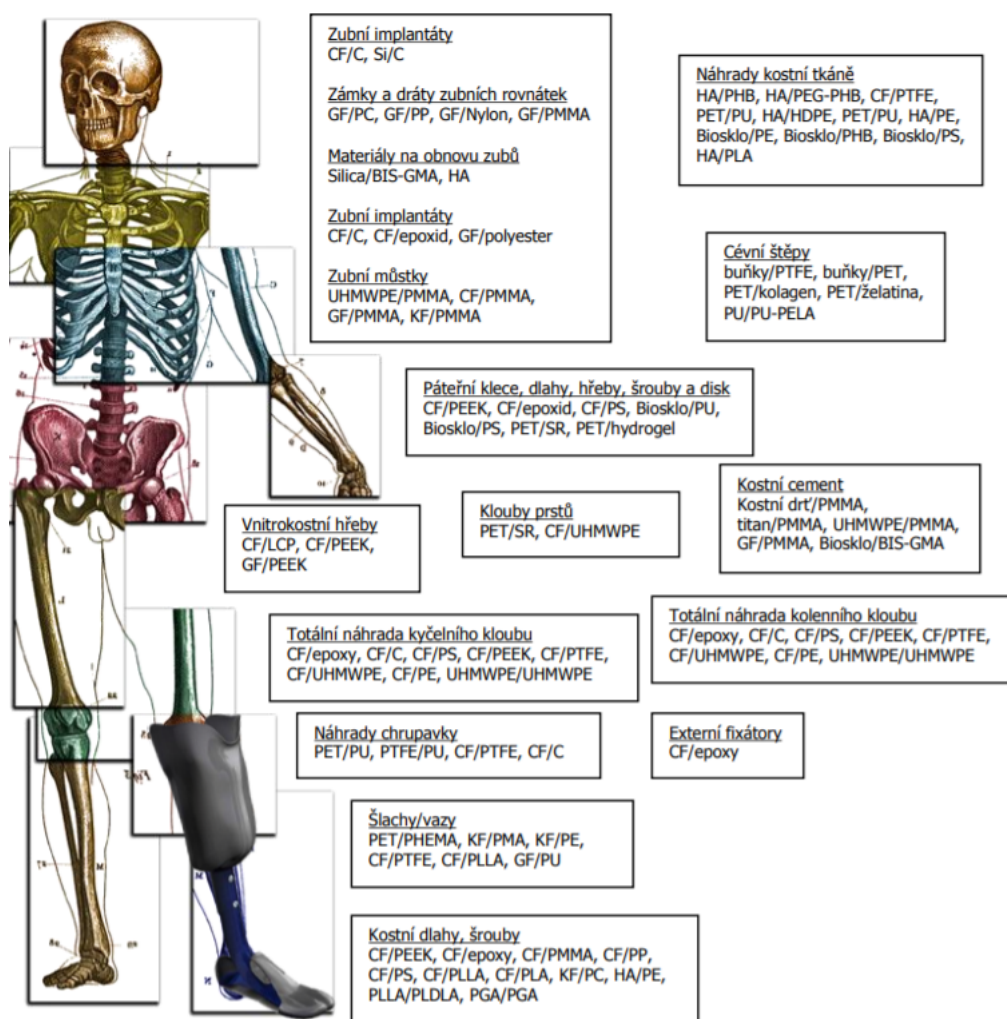
Přehled vlastností nejčastěji používaných druhů polymerních matric je uveden v Tab. 3. Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny i hodnoty pro matrici keramickou a kovovou.

Tab. 3: Vlastnosti různých druhů matric [16].

<b>Materiály</b>	<b>Epoxidy</b>	<b>Polyestery</b>	<b>Fenoly</b>	<b>Polyamidy</b>	<b>Termoplast</b>	<b>Keramika</b>	<b>Kovy</b>
Modul pružnosti v tahu (GPa)	4-5	2-4	6-12	3-4	2-5	3-12	5-50
Mez pevnosti v tahu (MPa)	34-103	21-89	34-62	41-189	34-138	28-132	48-482
Max. provozní teplota (°C)	93-177	79-141	149-204	204-316	171-232	815-2204	538-1093
Hustota (g.cm <sup>-3</sup> )	1,2-1,25	1,1-1,2	1,3-1,4	1,3-1,4	1,1-1,2	1,8-2,5	2,0-6,0
Absorpce vlhkosti (%)	0,1-0,7	0,2-0,6	-	1,1-1,2	0,01-0,3	-	-
Prodloužení (%)	3,0-4,0	1,4-4,0	0,5-0,8	1,1-60	-	-	-
Koef. teplotní roztažnosti (x 10 <sup>-5</sup> ) (K <sup>-1</sup> )	6-7	-	3-5	3-5	3-5	0,5-0,6	0,6-1,2

### 3 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V MEDICÍNĚ

Potřeba polymerních materiálů v medicíně souvisí se zraněními, nemocemi, vrozenými vadami i stárnutím populace. Kompozitní materiály se uplatňují v řadě oblastí medicínských aplikací, od zubních implantátů, přes náhradu kloubů, orgánů, šlach, chrupavek, až po vnější (dlahy, fixátory) a vnitřní fixace kostí. Celkový přehled použití kompozitních materiálů je schematicky znázorněn na obr. 19.



Obr.19: Využití kompozitních materiálů v medicíně [30].

#### 3.1 Požadavky na materiály pro medicínské aplikace

Požadavky na výrobu malých, složitých a přesných dílů medicínského průmyslu se neustále zvyšují. Medicínský průmysl, to není jen výroba přístrojů, lékařských a chirurgických nástrojů, ortopedických pomůcek, ale také se týká výroby spousty chirurgických implantátů. To představuje mnoho tvarově složitých a komplikovaných dílů a minidílů. Tím vzrůstají

požadavky na nové typy materiálů takových, aby zajistily bezproblémové reakce v lidském organismu [31].

Nejdůležitější vlastností pro materiály využívané v medicíně je jejich biokompatibilita. Přísnější požadavky samozřejmě platí pro materiály, které se vkládají přímo do těla, nebo jsou s tělem v přímém kontaktu. Materiály použité pro lékařské účely musí být sterilní, tzn. že nesmí být zničeny nebo náhle změněny sterilizačními postupy, jako jsou suché teplo, autoklavování, radiace nebo chemické postupy [32].

Biokompatibilita neboli snášenlivost materiálů s biologickým prostředím, se hodnotí z hledisek mechanických, strukturních a biologických vlastností:

- Mechanické vlastnosti – tuhost, pružnost, pevnost, tvrdost, houževnatost, únava atd.,
- fyzikální vlastnosti – hustota, topologie povrchu, barva, RTG kontrast,
- chemické vlastnosti – složení, koroze, degradace, nasákavost,
- biologické vlastnosti – toxicita, dráždivost, alergičnost a další [31].

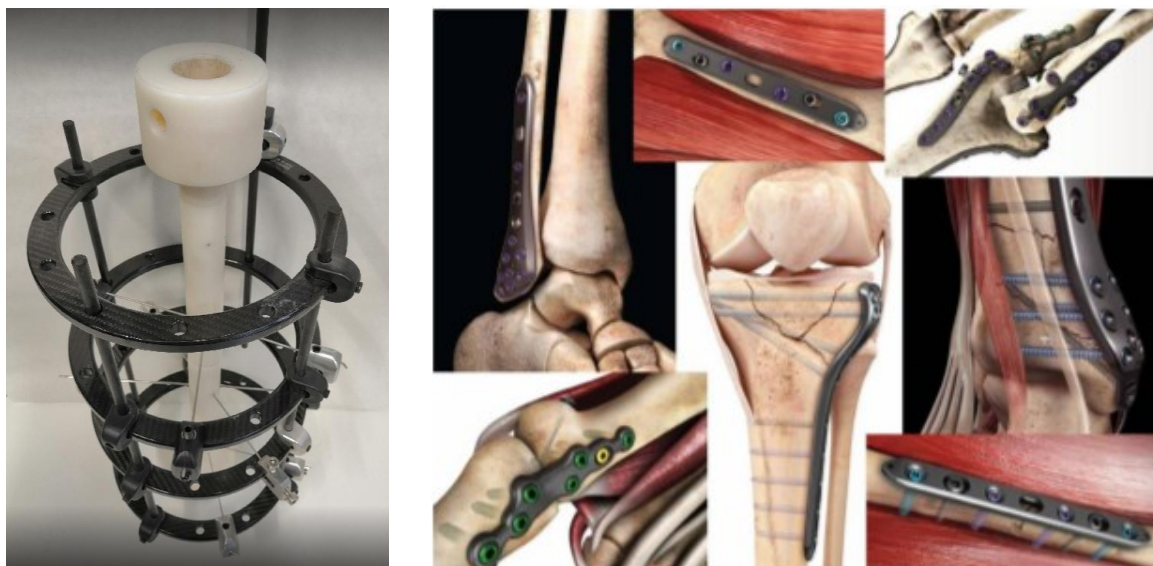
### **3.2 Využití kompozitů v jednotlivých oblastech medicíny**

Polymerní kompozity vyztužené vlákny (FRP) nacházejí v lékařském sektoru stále více uplatnění z důvodu jejich nízké měrné hustoty, vysoké tuhosti a biologické kompatibility. Při výrobě protéz končetin se např. využívá odolnosti proti únavě a flexibility kompozitních materiálů. Chemická inertnost uhlíkových vláken vedla k řadě chirurgických aplikací, kde se materiál využívá ve spojení nebo místo kovových i polymerních materiálů [33].

#### **3.2.1 Fixace zlomenin**

Nejčastěji jsou fixátory používány v léčení otevřených nebo komplikovaných tříštivých zlomenin dlouhých kostí a kloubů, pánve i např. páteře. Fixátory se dělí na vnější, tzv. externí fixátory (Ilizarův fixátor) a na vnitřní fixátory (hřebíky pro dlouhé kosti, šrouby, dlahy...). Externí fixátory, jak už napovídá název, se aplikují vně těla díky konstrukci, ze které vedou dráty, které úlomky kosti navrací na své místo bez nutnosti většího zásahu skalpelem skrz kůži a svaly. Výhoda externích fixátorů spočívá především v jednoduchosti operační metody s minimálním poškozením tkání, snadná hygiena a převazy postiženého místa díky otevřené konstrukci. Nepříjemností u této fixační metody jsou časté infekce v místě styku průchodu drátu a kůže. Nevýhodou je také mohutnost a váha kovového fixačního rámu, což omezuje pohodlí pacienta. Vnitřní fixátory se aplikují přímo na kost, do kosti. Po zhojení jsou z těla komponenty

vyjmuty nebo na/v kosti ponechány. Např. neresorbovatelné dlahy se vyrábí z termoplastických pryskyřic (PEEK– Polyetereterketon) vyztužené uhlíkovými a skleněnými vlákny. Jsou tak biologicky inertní a mají dobré únavové a pevnostní charakteristiky. Výhoda biodegradabilních dlah spočívá v tom, že se přizpůsobují tuhosti v průběhu hojení kosti a odpadá nutnost reoperace. Pomůcky na vnější a vnitřní fixaci jsou ukázány na obr. 20 [31, 34].



Obr. 20: Konstrukce externí (vlevo) a vnitřní (vpravo) fixátoru [vlastní zdroj, 31].

### 3.2.2 Implantáty

Z pohledu volby materiálů pro implantát je důležité mít na vědomí dobu, po kterou má být implantát součástí těla.

*Náhrada kolenního kloubu.* Tady je aplikace kompozitních materiálů celkem komplikovaná. Snaha byla je využít hlavně pro zlepšení např. proti otěru kluzných komponent náhrady, kdy se do vrstvy UHMWPE přidávala krátká uhlíková vlákna pro dosažení vhodných tribologických vlastností. V klinické praxi ale výsledky nebyly úplně přesvědčivé a stále se bádá nad materiálem, který by byl pro tento účel vhodnější [35, 36].

*Kyčelní náhrada.* U kyčelní náhrady docházelo k té samé situaci jako u náhrady kolenního kloubu, kdy se použitá uhlíková vlákna uvolňovala do organismu. Dobrých výsledků zde dosáhla kombinace kompozitních materiálů a čistých titanových vláken. Kompozitní dřík má lepší vlastnosti než celo-titanový, protože použít velmi tuhého titanového dříku má za následek to, že na sebe přebírá úlohu kosti a okolní kost se tak demineralizuje a tím ztrácí svou pevnost. To je v ortopedické praxi nepřípustné. Kompozitní dřík také lépe tlumí dynamické síly působící na implantát a jeho okolí a zvyšuje průměrnou životnost [35, 37].

*Pátevní implantáty.* Použití kompozitů v pátevní chirurgii se omezuje hlavně na dvě oblasti: fúze obratlů, což znamená znehybnění dvou sousedních obratlů pomocí náhrady části obratle, a meziobratlových disků. I zde se implantáty doplňují hřeby, šrouby a dlahami pro lepší fixaci v procesu hojení. Důležité je, aby materiál náhrad disku nebo obratle měl odpovídající pevnost a tuhost jako obratle a disky zdravé. To je velmi komplikované, protože do současnosti v podstatě nebyl zaveden materiál, který by dokázal úspěšně reprodukovat jedinečné mechanické a „transportní“ chování přirozeného disku. Další komplikací je slabá tvarová a mechanická kompatibilita, kdy může dojít k zúžení či porušení míšního kanálu [36].

### **3.3 Lokomoční pomůcky**

Lokomoční pomůcky patří mezi adjuvatika, což je jedna ze šesti oblastí, kterými se zabývá medicínsko-technický obor, tzv. ortopedická protetika. Ortopedická protetika zahrnují výrobu a distribuci rehabilitačních pomůcek. I toto je oblast, kde by se daly kompozity plně využít, nebo by mohly částečně nahradit některé z již zastaralých a nevyhovujících materiálů [38].

Lokomoce je definovaná jako schopnost člověka pohybu v prostoru pomocí svalové činnosti. Nejběžnějším typem lokomoce je chůze, tzn. cyklický pohyb dolních končetin.

Lokomoční pomůcky se zahrnují mezi rehabilitační pomůcky, které přispívají ke stabilizaci nebo zlepšení zdravotního stavu pohybově handicapovaným lidem. Tyto pomůcky jsou určeny především pro pacienty s ortopedickými, neurologickými nebo metabolickými problémy, vlivem úrazů, vrozených vad nebo vlivem stárnutí [38, 36].

Pomůcky pro lokomoci se užívají buď dočasně k redukčním účelům, nebo dlouhodobě k usnadnění pohybu [36].

Lokomoční pomůcky se dělí na opěrné nebo na substituční a kompenzační. Opěrné slouží k odlehčení dolních končetin (hole, berle, chodítka), substituční a kompenzační nahrazují nebo kompenzují funkční deficit pohybu. Také umožňují lidem s postižením pohybového aparátu dosáhnout určitého stupně pohybové samostatnosti. Jedná se např. o invalidní vozíky [38].

#### **3.3.1 Hole a berle**

*Hole.* Tato pomůcka je určena pro zvýšení rovnováhy. Hole se vyrábí převážně z hliníku a dřeva a jsou opatřeny protiskluzovým gumovým nadstavcem. Vyrábí se jako jednobodové nebo vícebodové, které jsou sice stabilnější, ale zato těžší a náročnější na manipulaci. Hole

se ještě liší tvarem madla. Madla mohou být deštníková nebo tzv. tvaru labutí šíje, které je mnohem stabilnější a lépe padnou do ruky.

*Berle.* Mají podobné použití jako hole, ale jsou určeny pro silnější lokomoční deficity. Částečně nebo úplně odlehčují dolní končetiny, což je zajištěno převedením zatížení na horní končetiny. Berle se využívají u pacientů po úrazech dolních končetin a páteře.

Nejužívanějšími typy holí a berlí jsou ukázány na obr. 21 [39, 40].



Obr. 21: Hole (vlevo); a) jednobodová s deštníkovým madlem, b) s madlem tvaru labutí šíje c) čtyřbodová. Berle (vpravo); a) podpažní, b) francouzská, c) kanadská [39].

### 3.3.2 Chodítka a vozíky

*Chodítka.* Používají se u pacientů s poruchami rovnováhy, kdy poskytují lepší oporu a větší stabilitu než berle a hole. Chodítka se vyrábí jako čtyřbodová nebo dvou-, tří- a čtyřkolová.

*Vozíky.* Patří mezi nejčastěji využívané pomůcky tělesně handicapovaných lidí. Vozíky se dělí na mechanické, elektrické a na speciální sportovní vozíky. Jejich využití závisí na druhu a závažnosti postižení. Mechanické vozíky zahrnují i speciální toaletní, které jsou vhodné do sprchy. Elektrické vozíky jsou konstruovány podle toho, jestli jsou určeny do interiéru nebo exteriéru. Zástupce chodítka a vozíku lze pozorovat na obr. 22 [39, 40].



Obr. 22: Chodítka čtyřkolová (vlevo), standardní mechanický vozík (vpravo) [41, 42].

### 3.3.3 Protetika a ortézy

Protetika jsou další oblastí v rámci rehabilitačních pomůcek a slouží k nahrazení chybějící části těla i pohybové funkce této části. U tělesně postižených se jedná o protézy horních a dolních končetin. Protézy horních končetin jsou rozděleny na protézy pažní, předloketní, protézy prstů a ruky, dále protézy kosmetické a protézy myoelektrické, které zajišťují funkci úchopu. Myoelektrické protézy mají motorky s hydraulickým zařízením, které zajišťují provedení aktivního úchopu či otočení ruky. Impuls pro provedení takového pohybu vychází z povrchových elektrod, které jsou umístěny na těle pacienta, pro snímání elektrických potenciálů z jiných aktivovaných svalů. Tato protéza patří mezi dokonalejší, ale je složitější na ovládání. Protézy dolních končetin se dělí na protézy po amputaci v kyčelním kloubu, protézy stehenní, protézy po amputaci v kolenním kloubu, protézy bérce a protézy chodidel. Vyvíjí se také bionické protézy, ale jsou velmi finančně nákladné [43, 44]. Některé z protéz jsou zobrazeny na obr. 23.



Obr. 23: Myoelektrická protéza (vlevo), typy dolních protéz (vpravo) [45, 46].

Ortézy jsou ortopedické, externě aplikované prostředky a pomůcky, které modifikují strukturální nebo funkční charakteristiky nervového, svalového a skeletárního systému. Ortézy se aplikují u pacientů po úrazech, onemocněních (ortopedická, neurologická, chirurgická) nebo v případě vrozených vad. Slouží jako opora, zpevnění nebo korekce postavení pohybového aparátu, kdy je funkce části těla oslabena nebo vyhaslá. Jedná se především o ortézy trupové, bederní, loketní, ramenní, nebo např. ortéza kolenního kloubu. Liší se konstrukcí i účelem pro který jsou určeny. Z hlediska jejich funkce, rozlišujeme odlehčující ortézy, ortézy zajišťující klouby a redresní dlahy nebo skořepiny. Vyrábí se hlavně z kůže, dřeva či termoplastů [47, 48, 49].

## 4 DESIGN POLYMERNÍCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ

Při navrhování kompozitních materiálů vědci a inženýři důmyslně kombinovali různé kovy, keramiku a polymery, aby vytvořili novou generaci mimořádných materiálů. Většina kompozitů byla vytvořena pro zlepšení mechanických vlastností, jako je tuhost, houževnatost a odolnost vůči okolnímu prostředí a vysoké teplotě [5].

Pro návrh kompozitu je důležité brát v úvahu jeho budoucí aplikaci, na které závisí jak výběr matrice a výztuže, tak i postup přípravy a výroba tohoto vláknového kompozitu [16].

### 4.1 Aspekty návrhu kompozitních systému

Při koncepci návrhu kompozitní konstrukce je třeba počítat s několika faktory, které ovlivňují jeho použití. Hlavní faktory jsou následující:

*Hmotnost.* Kompozity jsou známé pro svou nízkou měrnou hustotu (průměrně  $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) při zachování pevnostních charakteristik. V porovnání s ocelí ( $7800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) nebo hliníkem ( $2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) je to výrazný rozdíl, a proto kompozity stále používanější.

*Tvarovatelnost.* Celá výroba kompozitu je vždy přizpůsobena konečnému tvaru výrobku. Kompozity jsou obecně dobře tvarovatelné. Záleží také na typu vazby výztuže.

*Cena.* Důležitý aspekt jak pro výrobce, tak pro zákazníka. V ceně kompozitního dílu se odráží náklady na suroviny pro jeho výrobu a náklady na samotnou výrobu. Právě cena kompozitů brzdí jejich masivnější využití. Další nákladnou věcí jsou i nedestruktivní zkoušky při zjištění vady kompozitního dílu. Je třeba využít techniky, která zmapuje i vnitřní strukturu materiálu.

*Bezpečnost.* Určení bezpečnosti u kompozitních konstrukcí je složitou záležitostí. Je těžké určit, zda je bezpečnost splněna či nikoliv. Z tohoto důvodu se pro posouzení bezpečnosti při namáhání zavádí tzv. specifická absorpce energie, SAE (rovnice 4.1). Vyjadřuje množství pohlcené energie na jednotku hmotnosti zdeformovaného materiálu [50, 51].

$$SAE = \frac{W}{V \cdot \rho}, \quad [\text{J}\cdot\text{g}^{-1}] \quad (4.1)$$

kde  $W$  je množství pohlcené energie [J],

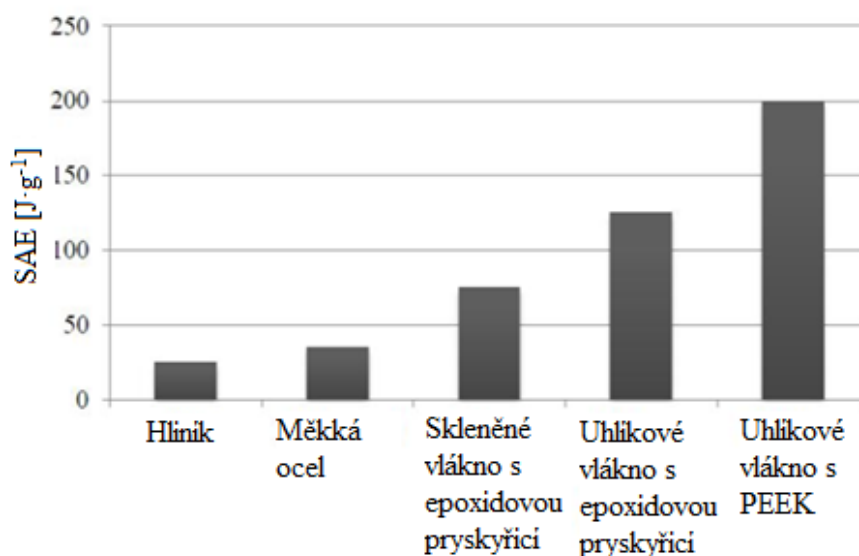
$V$  je objem zdeformovaného materiálu [ $\text{cm}^3$ ] a

$\rho$  je hustota zdeformovaného materiálu [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ].



Jedná se o veličinu pro porovnání mezi různými materiály. SAE se neřadí mezi materiálové charakteristiky, protože závisí na geometrii vzorku. Pro kovové materiály se specifická absorpční energie pohybuje v rozmezí  $15\text{--}25 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$  a pro kompozitní materiály  $40\text{--}80 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ . Z toho vyplývá značný potenciál, který nabízí kompozitní materiály pro absorpci nárazové energie, zejména u aplikací náročných na nízkou hmotnost.

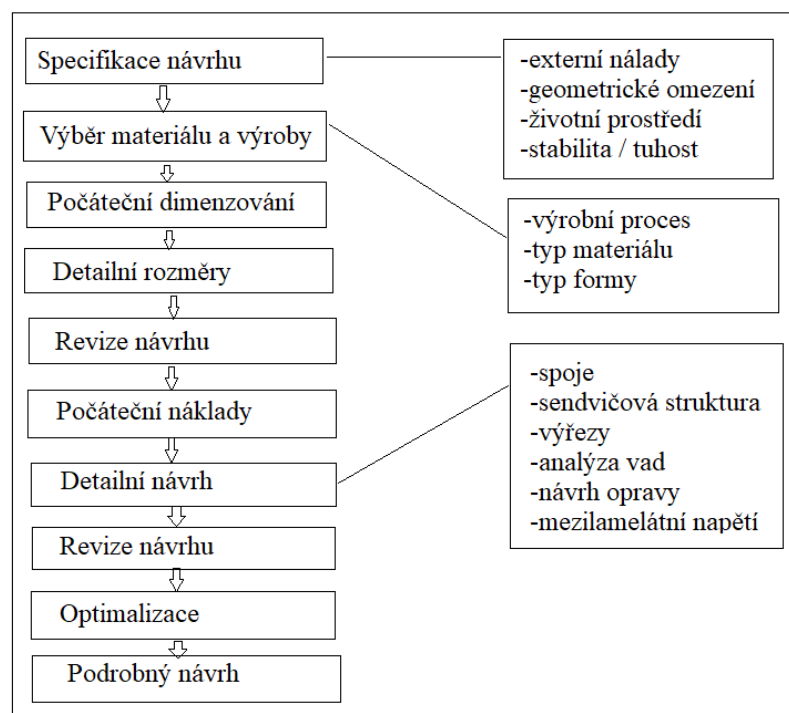
Kromě výpočtů se používají také orientační diagramy průběhu pohlcení energie. Experimentální výsledky pohlcené energie vzorků různých materiálů jsou graficky znázorněny na obr. 24.



Obr. 24: Srovnání pohlcení energie SAE pro různé materiály [51].

## 4.2 Metodika návrhu kompozitní konstrukce

Složitost kompozitních materiálů komplikuje návrh kompozitních částí. Proto je důležité dodržovat obecný plán designu. Nejprve vyžaduje, stejně jako většina jiných konstrukčních systémů, zavedení funkční specifikace součástí. Poté jsou prováděny různé kroky v návrhu a analýze. Základ metodiky návrhu kompozitní struktury lze provést řadou vývojových postupů. Ty jsou uvedeny ve vývojovém diagramu znázorněném na obr. 25 [16].



Obr. 25: Vývojový diagram návrhu kompozitní struktury [16].

1. *Specifikace návrhu.* Jde o nejdůležitější krok v návrhu. Je založen na přesné a detailní specifikaci funkce komponentu při skutečném použití, což vždy šetří čas a peníze. Výsledkem je napoprvé fungující produkt, který splňuje požadavky zákazníka. Specifikace konstrukce je zvláště důležitá pro kompozitní konstrukce, protože existuje spousta dalších způsobů, jak udělat horší návrh, než by tomu bylo např. s tradičními materiály, např. kovy.
2. *Výběr materiálu a výroby.* Většina dodavatelů materiálů má preferovaný seznam kombinací vláken a pryskyřice, ze kterého se může volit, ale první je nutné vybrat typ vlákna, formu vlákna a typ pryskyřice. Obvykle se volí skleněná nebo uhlíková vlákna v závislosti na budoucí aplikaci. Výběr formy vláken je obecně založen buď na pohodlí výroby, nebo na složitosti tvaru. Výběr pryskyřice záleží na provozním prostředí. Druhou částí kroku je výběr způsobu výroby (výrobní prostředky, čas, náklady a sériovost výrobků).
3. *Počáteční dimenzování (návrhové schéma).* Počáteční rozměry kompozitní struktury se používají k určení počtu vrstev vyžadovaných v různých orientacích. Tento krok lze provést pomocí jednoduchých grafů. Pouze tyto výsledky k dokončení návrhu, jelikož je třeba při konečné konfiguraci uvažovat s dalšími faktory.
4. *Detailní rozměry.* Vyhodnocení detailních rozměrů kompozitní struktury vyžaduje výpočetní techniku za účelem vyhodnocení vlastností v rovině kompozitu (tuhost

a pevnostní charakteristiky laminátu). Analýza by také měla poskytnout odhad počátečního stavu porušení (porušení první vrstvy) a konečnou strukturu kompozitní konstrukce.

5. *Revize návrhu.* První kontrola návrhu se používá k ověření vývoje laminátu. Výsledky mechanických a fyzikálních vlastností jsou porovnávány s funkční specifikací návrhu. Požadavky jsou buď splněny, překročeny nebo nedostatečně splněny.
6. *Počáteční náklady.* Počáteční náklady na produkt se mohou vrátit, pokud je projekt finančně výhodný. Předchozí kroky definovaly objem konstrukce, použité materiály a způsob výroby. S těmito informacemi, znalostí o použitých spotřebních materiálech a výrobním množstvím lze odhadnout náklady na jednu část. To je důležité pro pokračování projektu.
7. *Detailní návrh.* Tento krok zahrnuje řadu činností, jako je návrh spoje, zapuštění otvorů a výřezů, provedení sendvičových struktur, zkoumání potenciálních interlamelárních oblastí napětí, účinků poškození a opravitelnosti konstrukce. Pro dokončení této fáze návrhu projektu musí být použity dobré techniky analýzy napětí, použitelné pro kompozitní materiály.
8. *Revize návrhu.* Při druhé revizi návrhu se dokončuje podrobná projektová práce. Zde se zvažuje zlepšení konstrukce kompozitní struktury, které by pomohlo snížit náklady. Toho může být dosaženo např. redukcí výrobních kroků nebo rychlejší výrobou dílů.
9. *Optimalizace.* Tento krok zahrnuje malé přípustné změny u jednotlivých vrstev, změny materiálové formy, orientace vrstev a postupu kladení apod. Nová analýza by se měla provést už po změně jednoho aspektu, tak aby bylo jasné, která změna přispěla k celkovému zlepšení nebo snížení strukturálního výkonu.
10. *Podrobný návrh.* To obvykle zahrnuje provedení určité formy komplexní analýzy napětí, jako je například analýza metodou konečných prvků. Podrobná analýza návrhu usiluje o další strukturální zlepšení bez nákladů. Podrobná analýza namáhání kompozitních struktur vyžaduje dostatečný čas zpracování, zvláště pokud jde o přesnou analýzu [16].

## 5 ÚVOD DO MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

Materiály s konvenčních materiálů jsou stále častěji doplňovány nebo nahrazovány materiály kompozitními, protože kompozity mají unikátní vlastnosti, které se dají aplikovat tam, kde je třeba snížit hmotnost, zvýšit pevnost a tuhost nebo prodloužit životnost. U kompozitů je ale problémem předem určit jejich statické a dynamické mechanické vlastnosti. Pro získání bližších informací musí být kompozitní materiály podrobeny zkouškám v průběhu jejich výroby nebo dokonce až na hotovém výrobku. To je samozřejmě zdlouhavé a nákladné. Usnadnit tento výrobní proces lze pomocí unikátního softwaru pro pokročilé modelování a simulaci struktur a vlastností daného materiálu.

Trendy v navrhování výrobků se během 20. století posunuly dopředu. Požadavky na ergonomické vlastnosti a lepší prodejnost klade zvýšené nároky na konstrukční a designová řešení. Se změnou tvaru souvisí i složitější průběhy napětových a deformačních stavů. Pro taková řešení již nestačí klasické metody a je třeba využít moderní výpočtové metody [52, 53].

Nejznámějšími společnostmi, které se zabývají vývojem a výrobou modelovacích softwarů jsou v dnešní době společnosti Autodesk (Autodesk Inventor) nebo Dassault Systém (CATIA V5, Solidworks).

### 5.1 Systémy počítačového modelování

Konstrukční systémy lze rozdělit do dvou oblastí:

- Systémy na bázi kreslení rovinných výkresů (AutoCAD),
- systémy na bázi parametrického modelování (generování výkresů z vytvořených modelů, např. Autodesk Inventor).

První skupina má své výhody hlavně v široké nabídce kreslicích prvků, kót, písma, nebo ve snadné práci s měřítkem. Z důvodu udržení konkurenceschopnosti, snížení nákladů a zvýšení zisku vznikají modelovací programy, kdy se postupně z prvních základních 2D CAD programů při zdokonalování počítačové techniky začaly do popředí dostávat 3D modelovací softwary. Velkým benefitem je i časová úspora konstrukčního procesu. Vymodelovat prvek, promítnout ho v konkrétní rovině do výkresu a okótovat zabere jen pár minut. Navíc tyto systémy nezjednodušují jen konstrukční proces, ale i proces technologický, což třeba AutoCAD nedokáže. 3D model totiž reprezentuje skutečný výrobek s virtuálně přiřazeným materiálem, z něhož se dají získat vlastnosti, jako hustota, pevnost nebo tuhost. Tak pracuje téměř každý

CAD systém na bázi parametrického modelování, který obsahuje modul pro zpracování zatížení metodou konečných prvků (MKP) [53, 54].

- CAD (Computer Aided Design)

Jedná se o aplikaci, která umožňuje tvorbu geometrie výrobku, výrobní geometrie a 3D modelů. Práci usnadňují také knihovny součástí a dílů, nástroje pro simulaci a pevnostní analýzy, jež jsou součástí CAD systému.

- CAM (Computer Aided Manufacturing)

Systém pro přípravu a řízení operací ve výrobě (obrábění). Jako vstup slouží 3D model vytvořený v CAD aplikaci. Poté jsou data vytvořena pomocí CAM převedena do NC kódů. Kód slouží jako vstupní data pro obráběcí stroje.

- CAE (Computer Aided Engineering)

Jedná se o nástroje, které dokážou navrhovat, optimalizovat geometrii a vyhodnotit mechanické vlastnosti výrobku. Lze tak vytvořit virtuální prototyp a simulovat pevnostní analýzy a kinematiku, což je velmi žádoucí při snížení nákladů na výrobu fyzických prototypů a inovací výrobků.

- FEA (Finit Element Analysis)

Jde o aplikaci, která je založena na FEM (Finit Element Method), neboli MKP. FEA je součástí hybridního modelování, tj. kombinace plošných a objemových elementů. Tato aplikace je využívána pro pevnostní analýzy, stanovení kritických míst konstrukce, nebo také pro kontrolu navržených zařízení [53, 54].

## 5.2 Současný stav modelování kompozitních struktur

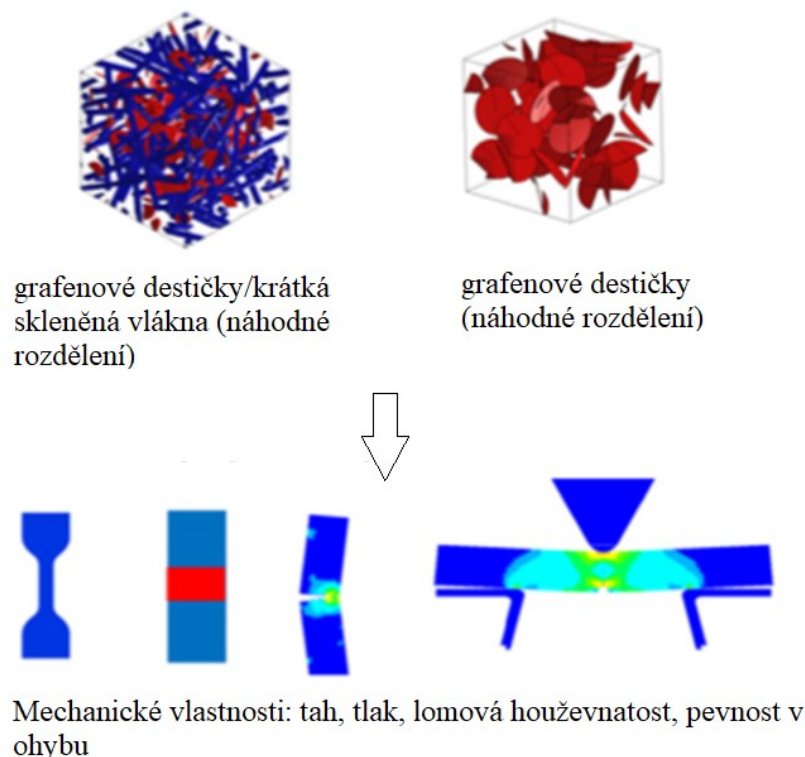
V současné době se modelováním kompozitních struktur pomocí softwaru zabývá malé procento lidí. Z tohoto důvodu je nedostatek literatury, ze které by bylo možné čerpat. Nicméně, je k dispozici pár publikací, které se věnují např. numerické predikaci mechanických vlastností různých typů kompozitních materiálů, kde je využit software např. jako *Digimat*. K dispozici jsou i další komerční softwarové balíčky pro modelování, jmenovitě AUTOCAD, SOLIDWORKS, CATIA, CREO, SOLID EDGE, ANSYS, LS-PrePost, OptiStruct, COMSOL nebo NX od Siemensu [55].

Např. **Gao (2018)** se zabýval numerickou predikací mechanických vlastností pryžových kompozitů vyztužených krátkými aramidovými vlákny při velké deformaci. Mechanickému

zkoušení podrobil vzorky s dvěma různými délkami vláken a třemi různými objemovými frakcemi vláken. Pro předpověď mechanické odezvy pryžového kompozitu navrhl Gao výpočetní model založený na metodě konečných prvků. Výsledky získané pomocí experimentu a pomocí numerické simulace v Digimatu-FE (Finite Element – popisuje chování materiálu z mikropohledu na základě MKP) se porovnaly, aby se ověřila spolehlivost FE-modelu. Výsledky byly téměř shodné. Došlo se tak k výsledku, že touto metodou je možné získat model s náhodně rozptýlenými vlákny s vysokým objemovým podílem vláken a také to, že pomocí numerické metody lze získat mechanické vlastnosti pryžového kompozitu za vysoké deformace [56].

**Potlurik (2018)** pro změnu využil modelování pro predikaci mechanických vlastností přírodními vlákny vyztuženého kompozitu. Zabýval se prognózou hodnoty Youngova modulu pružnosti v tahu a modulu pružnosti ve smyku daného materiálu. Porovnával výsledky získané analyticky, numericky i experimentálně. Chtěl zjistit, který model může přesně předpovědět hodnoty elastických i smykových vlastností kompozitních materiálů vyztužené přírodními vlákny. Srovnáním analýz Potlurik prokázal, že všechny modely vykazují velmi dobrou korelaci pro modul pružnosti v tahu i ve smyku. Modely FE byly dále implementovány v softwaru ANSYS [57].

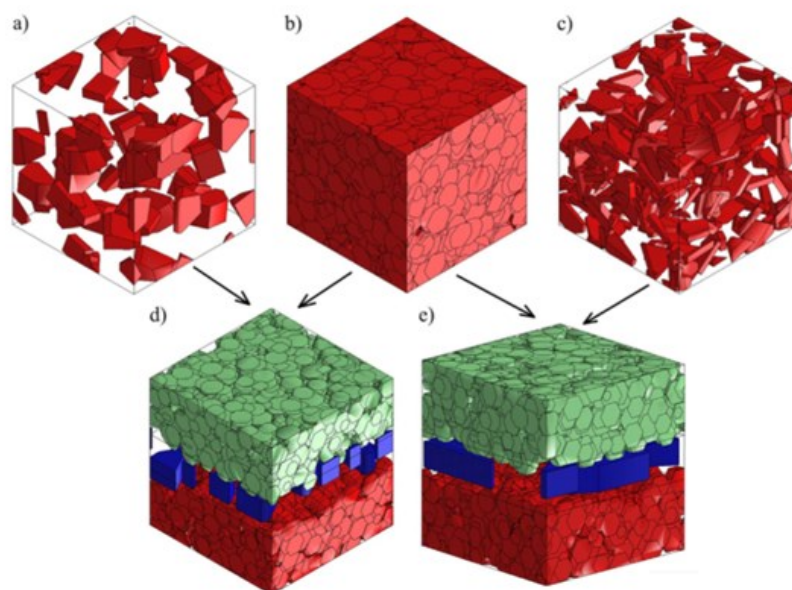
Dále se modelováním v Digimatu zabýval **Elmarakbi (2018)**, který ho využil při modelování hybridních skleněných profilů s polyamidovou matricí (PA6) vyztuženou grafenovými destičkami. Ve své práci zkoumal odolnost tohoto materiálu proti nárazu při hierarchickém modelování hybridního kompozitního materiálu skládajícího se z krátkých skleněných vláken vyztužujících matrici a z grafitových destiček. Metoda založená na více stupních využívá jak metodu střední homogenizace, tak techniky FE konečných prvků. Modelování hybridních třífázových kompozitů je založen na dvoustupňovém přístupu, který zahrnuje 2-fázové kompozity grafen / polymer jako matrice a krátká skleněná vlákna jako výztuž. Číselné charakteristiky, zahrnující tahovou pevnost, tlakovou pevnost, lomovou houževnatost a pevnost v ohybu podle Charpyho, umožňují stanovit prahové hodnoty poškození / selhání při použití při nárazu. Kompletní crash box je simulován implementací 3-fázového kompozitu pomocí uživatelem definovaného spojení Digimat / ANSYS (FE analýza), jako je znázorněno na obr. 26 [58].



Obr. 26: Modelování fází kompozitu a FE analýza [58].

Číselné výsledky, které jsou porovnány s výsledky konvenčních kompozitů, ukazují, že grafen pozitivně přispívá ke zlepšení specifické absorpce energie SEA. Strategie modelování pro 2-fázový kompozit spočívá v posílení polymerní matrice grafenovými destičkami. Modely jsou vytvořeny v nástroji DIGIMAT-MF (Mean Field – popisuje chování materiálů z makropohledu, založen na homogenizační metodě). Matrice je elastoplastický polyamid, zatímco grafenové destičky jsou považovány za elastické.

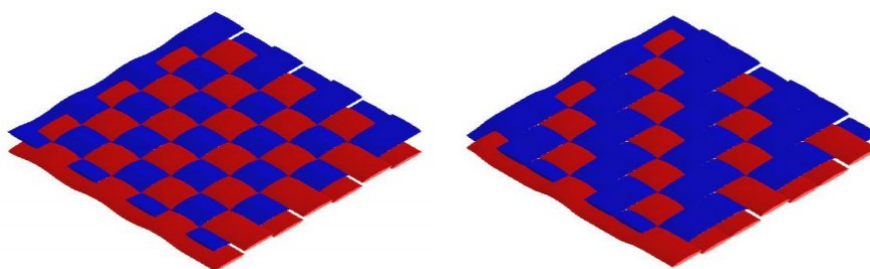
**Trzepieciński (2017)** se zabýval experimentálním výzkumem stanovení vlastností keramického materiálu  $\text{BaTiO}_3$  v každém stupni jeho výroby: příprava prášku, granulace a slinování. Získané pelety  $\text{BaTiO}_3$  byly spojeny pomocí dvou druhů elektricky vodivých epoxidových lepidel (na bázi Ag a na bázi Fe). Na základě výsledků dokončeného výrobního procesu  $\text{BaTiO}_3$  pelet (tj. velikosti zrna, poréznosti a hustoty), byla provedena homogenizace RVE (Representative Volume Element – reprezentativní objemový element) slepených keramických vrstev  $\text{BaTiO}_3$  pomocí softwaru Digimat-FE (obr. 27). Při homogenizaci se předpokládá, že materiál je v makroskopickém měřítku dostatečně homogenní, ale v mikroskopu heterogenní kvůli existenci inkluzí, zrn atd. [59].



Obr. 27: RVE (a) Epoxidu na bázi Ag, (b) BaTiO<sub>3</sub>, (c) Epoxidu na bázi Fe, (d) kompozit BaTiO<sub>3</sub>-Ag-EA-BaTiO<sub>3</sub> a (e) and BaTiO<sub>3</sub>-Fe-EA-BaTiO<sub>3</sub> [59].

Z výsledků simulace vyplynulo, že model RVE je schopen předpovídat hodnoty napětí a deformace v kompozitu BaTiO<sub>3</sub>-EA-BaTiO<sub>3</sub> vystaveného rozdílným napěťovým stavům, nebo že model RVE umožňuje zachytit realistickou deformaci epoxidových lepidel s kovovými inkluzemi.

U nás se modelováním a simulací pomocí softwaru Digimat věnoval **Válek (2016)** ve své diplomové práci, kde se zabýval modelováním plněných kompozitních systémů. Snažil se ověřit shodu experimentálně získaných vlastností zvoleného kompozitu s analytickým modelem. Kompozitní vzorky s uhlíkovou výztuží ve formě tkaniny (plátňová i keprová vazba) a epoxidovou matricí byly podrobeny tahové zkoušce. Současně tato struktura kompozitu byla vymodelována a následně zanalyzována pomocí softwaru Digimat-MF. Aby bylo možné získat reprezentativní objemový element RVE, nejprve se vytvořily modely obou typů tkanin, jako na obr. 28 [60].



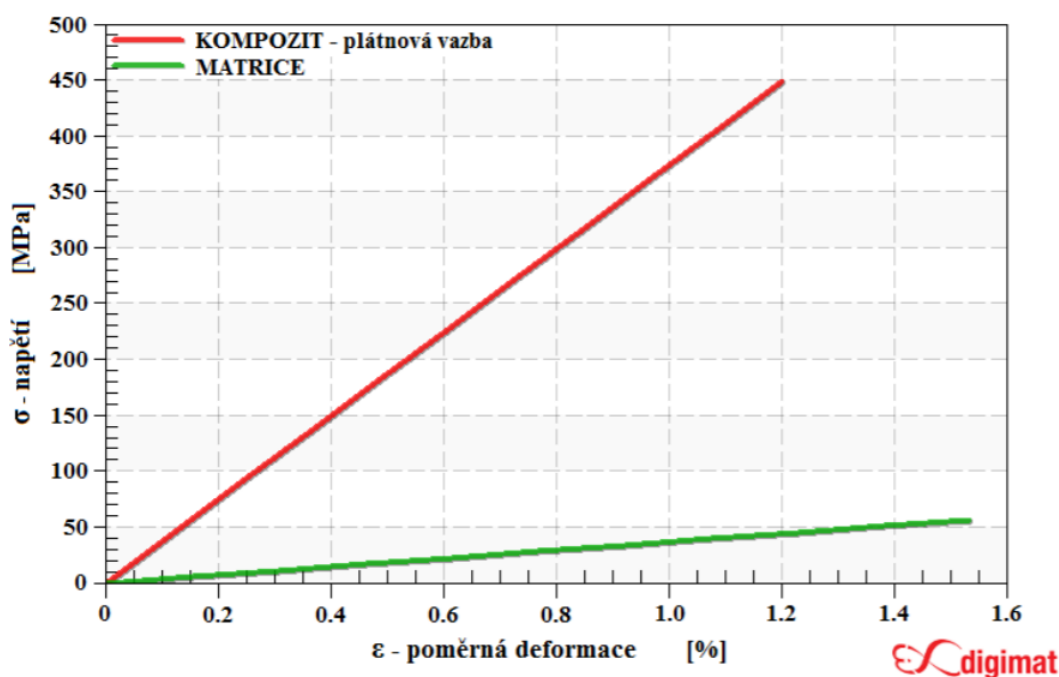
Obr. 28: Model tkaniny plátňo (vlevo) a kepr (vpravo) [60].



Software vypočetl i parametry pro jednotlivé modely tkanin, jako jsou plošná hustota, pórovitost, objemový podíl vláken. Aby byl materiál co nejrealističtější, je nutné do výpočtu zahrnout nechtěné fáze, jako jsou vady materiálu (bubliny, dutiny, ...). Protože nebylo jasné množství vzduchových bublin obsažených v kompozitu, program simuloval tři hranice (spodní, střední, vrchní) odhadovaného objemového podílu těchto vad. Tvar bublin byl idealizován v podobě koule. Po zadání zatížení (druh a směr) byla spuštěna analýza.

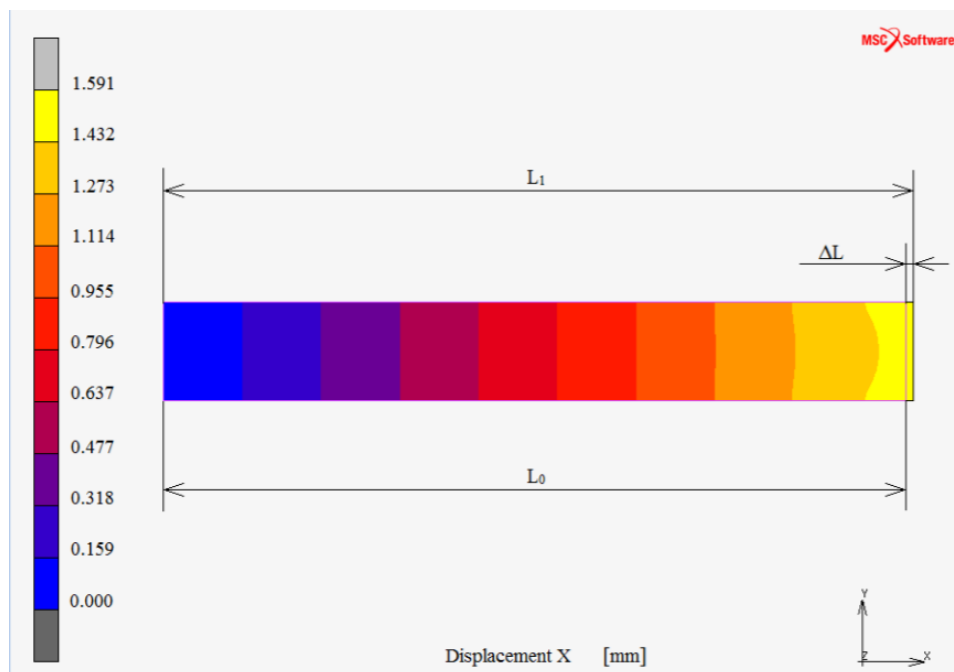
Pro simulaci tahové zkoušky vzorků byly vlastnosti RVE, získané ze softwaru Digimat-MF, převedeny Válkem do konečnoprvkového programu Marc Mentat 2014.1.0.

Virtuálně testovaným kompozitem byl systém vyztužený jednou vrstvou uhlíkové tkaniny s plátňovou vazbou. Digimat-MF vypočetl parametry a vykreslil graf závislosti napětí na deformaci materiálu (obr. 29), odkud lze vyčíst, že při poměrné deformaci  $\varepsilon = 1,2 \%$  je napětí  $\sigma = 450 \text{ MPa}$ . Pro porovnání je v grafu vykreslena i závislost napětí na deformaci pro samotnou matici kompozitu.



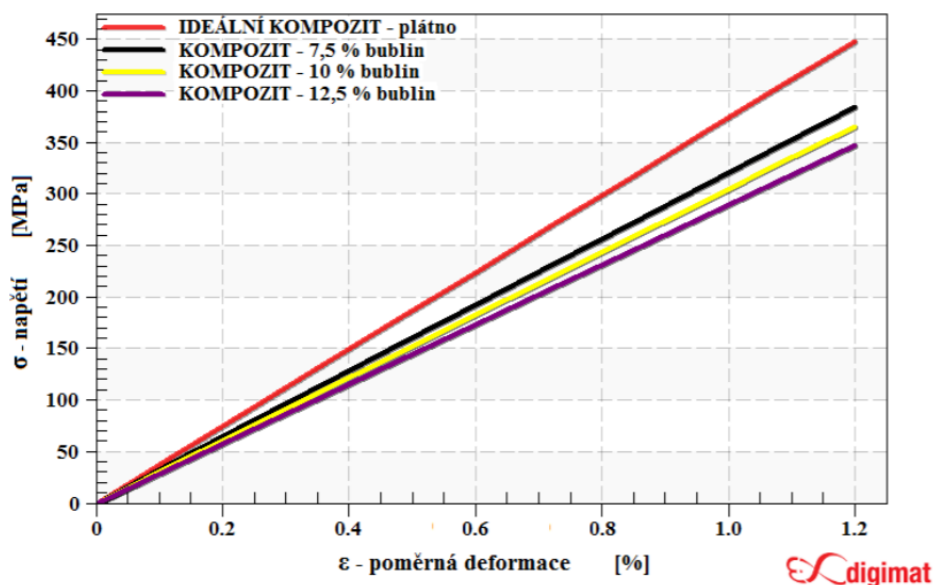
Obr. 29: Graf závislosti napětí na deformaci – plátňová vazba [60].

V programu Marc Mentat bylo vyhodnoceno prodloužení (obr. 30) simulovaného vzorku pro srovnání se skutečným protažením kompozitu zjištěného experimentálně.



Obr. 30: Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou – plátňová vazba [60].

Zahrnutím bublin v kompozitu byl vyhodnocen graf deformace-napětí, jako na obr. 31.



Obr. 31: Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami – plátňová vazba [60].

Z grafu je patrné, že vady v mikrostruktuře kompozitní struktury ovlivňují výsledek mechanických vlastností. Hodnoty struktury s bublinami jsou výrazně nižší, než je tomu u struktury ideální.

Stejnou analýzu provedl Válek i pro kompozit s keprovou vazbou. Výsledky experimentálního zkoušení a výsledky získané modelováním pomocí Digimatu a konečno-prvkového programu porovnal v tabulce, zobrazené na obr. 32.

<b>vlastnost</b> <b>kompozit</b>	<b>E - modul pružnosti v tahu [MPa]</b>	<b><math>\sigma_m</math> - maximální napětí [MPa]</b>	<b><math>\sigma_{0,5}</math> - napětí při <math>\varepsilon = 0,5\%</math> [MPa]</b>	<b><math>\Delta L</math> - prodloužení [mm]</b>
reálný - vazba plátno	28 000	337,00	130	1,420
ideální - vazba plátno	37 370	448,44	185	1,591
s 12,5 % bublin - plátno	28 967	347,53	142	1,822
reálný - vazba kepr	30 700	278,00	150	1,680
ideální - vazba kepr	37 732	339,59	188	1,166
s 10 % bublin - vazba kepr	30 785	277,01	153	1,429

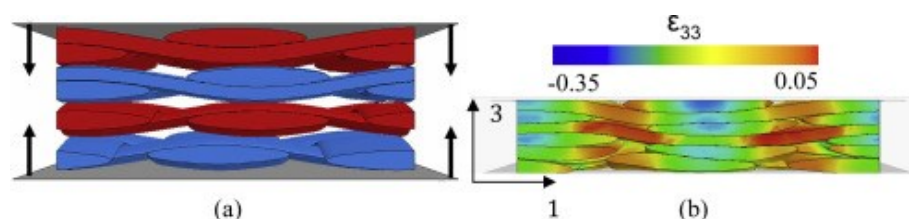
Obr. 32: Srovnání reálných a teoretických vlastností zkoumaných kompozitů [60].

Hodnoty pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu získané experimentálně a modelováním se zahrnutím určitého procenta bublin pro oba kompozitní systémy téměř shodovaly. Stejně tak i jejich měrné hmotnosti získané směšovacím pravidlem a softwarovým výpočtem. V simulacích však nebylo zahrnuto porušení vláken ani adheze, protože Digimat neumí počítat se špatným prosycením výztuže maticí. Výsledky tak tímto faktem mohou být ovlivněny. I přes některé nedostatky, jako možnost modelovat kompozit pouze v jedné vrstvě, je Digimat schopen predikovat výsledné atributy kompozitního systému s dostatečnou přesností [60].

Stejně jako Válek, problematikou modelování textilních výztuží se zabývali i jiní. O použití kompozitních materiálů obsahující textilní výztuže je větší a větší zájem, zejména pro pokročilé strukturální aplikace. Jednou z výhod textilních kompozitů je tažnost výztužné tkaniny, jejíž stavba se může měnit v celé struktuře. Kromě toho mohou být složité tvary výztuže přímo tkány moderními tkalcovskými stavy, což snižuje počet dílů potřebných pro kompozitní strukturu. Sníží se tak výrobní náklady a omezí se počet spojů, které představují ve struktuře materiálu klasické slabiny [61].

I v oblasti modelování poškození tkaných kompozitů existuje minimum publikací. **Doitrand (2015)** se věnoval ve své práci experimentální charakterizaci a strategii numerického modelování poškození v mezoskopickém měřítku tkaných polymerních kompozitů při kvazistatickém zatížení tahem. Zkoumal mechanické chování čtyřvrstvého kompozitu ze skleněných vláken / epoxidové matrice (plátňová vazba), který byl modelován

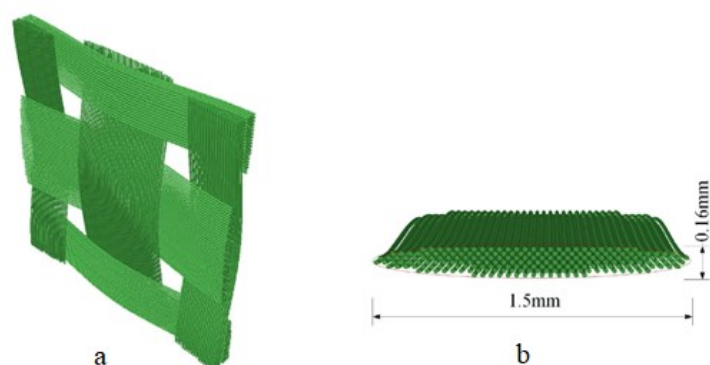
v mezoskopickém měřítku, přičemž se bere v úvahu suchá textilie před vstřikováním pryskyřice. Poškození modelovali zavedením diskretních trhlin do sítě FE reprezentativní jednotkové buňky kompozitu (RUC – Representative Unit Cell). Místa trhlin byla založena na experimentálním pozorování. Modeloval charakteristické mechanismy poškození, se kterými se dá setkat v mezoskopickém měřítku, a hodnotil jejich vliv na makroskopické mechanické chování materiálu. Aby se zvýšila objemová frakce kompozitních vláken, a tím se zlepšily její mechanické vlastnosti, suchá textilie se obvykle před přidáním matrice zhutní. Tvar a relativní poloha přízí mají značný vliv na lokální rozdělení napětí a deformaci v kompozitu, jakož i na iniciaci a šíření poškození. Pro přesné modelování poškození v mezoskopickém měřítku jsou proto nutné realistické geometrie. Výhodou plátnové tkaniny je, že má relativně jednoduchou geometrii s malou RUC. Počáteční geometrie byla vytvořena pomocí softwaru „TexGen“. Poté byl předformovací krok simulován pomocí softwaru *Abaqus* (obr. 33) s cílem získat realistickou frakci objemu textilie a deformaci průřezu tkaniny v důsledku kontaktu se sousední tkaninou.



Obr. 33: Simulace FE zhutnění čtyř vrstev textilie s hladkou vazbou; a) před zhutněním a b) po zhutnění FE ( $\epsilon_{33}$  - zhutnění) [62].

I **Liu, Ch. (2019)** se ve své publikaci zabýval problematikou modelování vláknové výztuže tkaninových kompozitů. Představil novou metodu modelování pro analýzu napěťových a deformačních polí těchto textilních kompozitů. Vláknová výztuž je generována pomocí optických vláken, poté se optická vlákna vloží do pozadí pevných sítí pro modelování kompozitů. Ve srovnání s tradičními modely tato metoda zjednodušuje geometrické modelování a procesy proplétání složitých struktur vláken uvnitř kompozitů. K prokázání přesnosti navrhované metody použil model jednotkové buňky kompozitu. Výsledky simulace zabudovaných modelů s optickými vlákny souhlasí s výsledky tradičních modelů pomocí MKP. Navrhovaný způsob použil Liu k predikci mechanické odezvy čtyřvrstvého kompozitu s plátnovou vazbou při zatížení tahem. Tkanina z optických vláken byla vytvořena v softwaru

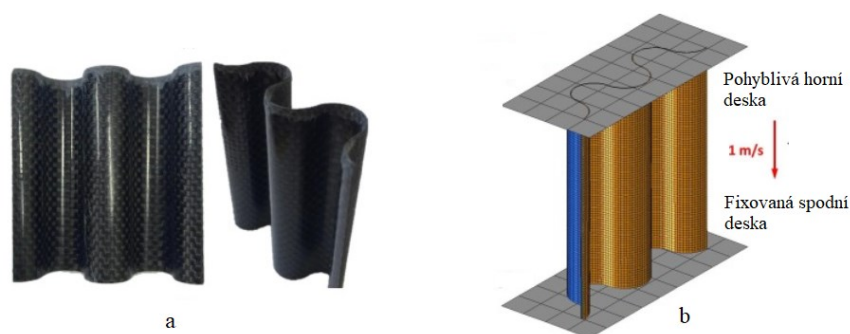
*Abaqus* vzájemným propletením optických svazků. Model tkaniny je zobrazen na obr. 34. Průřez optického svazku (obr. 34b) je definována elipsou [63].



Obr. 34: Geometrický model plátňové tkaniny: a) jednotková buňka plátňové tkaniny, b) průřez optickým svazkem [63].

Kvůli složité povaze porušení kompozitů je docela náročné přesně predikovat mechanické chování numerickými metodami, které brání jejich rychlému růstu průmyslových aplikací. Pro snížení nákladů a zkrácení cyklu vývoje produktu byly přijaty simulace pomocí MKP, které předpovídají mechanické chování kompozitů. Pro tyto účely bylo vyvinuto a využito mnoho dalších komerčních softwarů na bázi MKP, jako jsou LS-DYNA, PAM CRASH a ABAQUS.

Např. **Liu, Z. (2019)** vyvíjel numerický materiálový model, který by zahrnul plasticitu, modely od poškození po porušení a predikci mechanických vlastností tkaných uhlíkových kompozitních struktur CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Pro modelování bylo bráno v úvahu axiální zatížení vlnitého karbonového vzorku, jak je patrné z obr. 35.



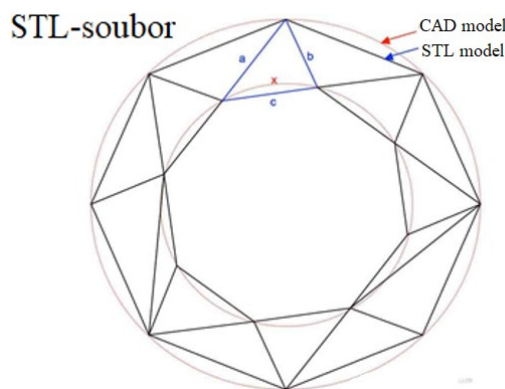
Obr. 35: a) Zvlněný karbonový vzorek, b) Simulace axiálního stlačení vlnitého vzorku [64].

Numerické výsledky korelovaly s experimentálními daty. Zjistilo se tedy, že navrhovaná metodologie může být slibná pro simulaci zatěžování tkaných kompozitních struktur, a tak může být zlepšena účinnost návrhu produktu [64].

## 6 3D TISK

3D tisk je aditivní technologie, která je podle normy ISO/ASTM 52900:2015 definována jako: „Proces spojování materiálů za účelem vytváření objektů z dat 3D modelu, obvykle vrstva po vrstvě“. [65, 66] Používá se k rychlé výrobě prototypových dílů i dílů koncových. Při tomto způsobu výroby lze použít širokou škálu materiálů, běžně kovy a polymery. Do popředí se dostávají i kompozitní materiály, ze kterých je možné tisknout již hotové výrobky s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Principem aditivní technologie je tak rozložení digitálních dat v podobě 3D modelu na tenké vrstvy, které pak 3D tiskem vytváří reálný výrobek, aniž by docházelo k úběru materiálu nebo k jeho zbytečnému přebytku a současně je dosaženo uspokojivé geometrické přesnosti [67].

3D model konkrétního dílu může být vytvořen pomocí CAD softwaru nebo také pomocí skenování reálného objektu. Získaná digitální data bývají uložena ve formátu STL (Stereolitografie) [68]. Povrch 3D objektu je vykreslen pomocí troj- nebo mnoho-úhelníků, jak lze vidět na obr. 36.



Obr.36: Schéma vykreslení CAD modelu do formátu STL [67].

Mezi výhody 3D tisku patří hlavně to, že lze vyrobit složité tvary a vnitřní struktury, které jsou pomocí konvenčních metod, jako je například vstřikování nebo lisování, obtížně dosažitelné nebo dokonce nemožné.

Každá technologie má při výrobě polymerních kompozitních dílů své výhody i svá omezení. Výběr výrobní technologie závisí na výchozích materiálech, požadavcích rychlosti zpracování, nákladech a požadavcích na funkčnost finálních produktů, prototypů. Na prototypu lze odzkoušet funkčnost, tvar i celková ergonomie při návrhu nových komponentů. Doba od návrhu

po hotový výrobek se tak díky zrychlenému procesu výroby významně zkrátí a vzniká tak prostor na řešení případných nedostatků v konstrukci [67].

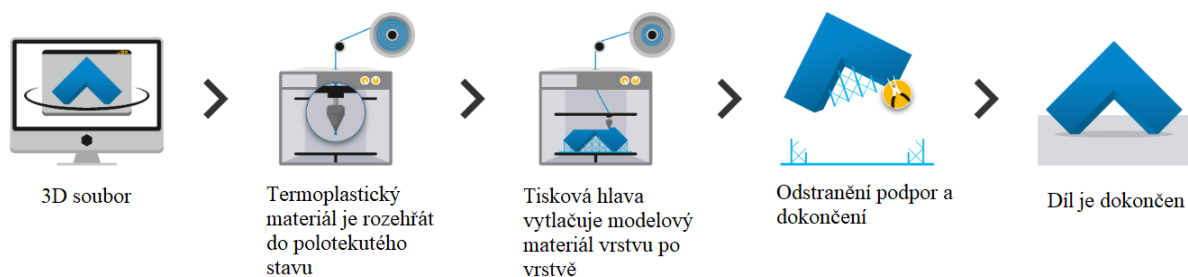
## 6.1 3D tisk kompozitních struktur

Konvenční metody výroby kompozitních materiálů zahrnují výrobní technologie jako vstřikování nebo lisování. Kompozity s nekonečnými vyztužujícími vlákny se vyrábí především lisováním do plochých dílů, což omezuje možnosti využití potenciálu těchto materiálů pro objemové součásti. Pro tvarově složitější komponenty je nutná výroba forem, což je jak časově, tak finančně náročné. Jednou z možností, jak práci ulehčit a zrychlit, je právě 3D tisk.

Podrobněji bude zmíněna pouze technologie FDM (Fused Deposition Modeling), která byla použita pro účely experimentální části této práce.

### 6.1.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Je nejčastěji používanou technologií 3D tisku, často také označována jako Fused Filament Fabrication (FFF). Tato technologie byla vynalezena a patentována firmou Stratasys. Principem FDM technologie, jež je schematicky naznačena na obr. 37, je tavení tiskové struny (filamentu) nejčastěji z termoplastického polymeru, která prochází tiskovou hlavou, kde je termoplast taven a postupně nanášen na tiskovou podložku. Zároveň v místech, kde je třeba, 3D tiskárna vytváří podpurné struktury. Je tak využito dvou druhů materiálů, jeden stavební a druhý podpurný.



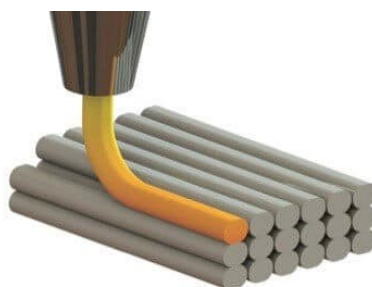
Obr. 37: Princip 3D tisku technologií FDM [69].

Tištěný díl vzniká vrstvením tenkých vrstev polymeru, jak ukazuje obr. 38. Při opakování tohoto postupu dosáhneme vytištění požadovaného dílu. Kvalita tištěných částí může být řízena změnou parametrů tisku, jako je tloušťka vrstvy, orientace tisku, šířka rastru, rastrový úhel a vzduchová mezera [70, 71].

Kvalita povrchu je ovlivněna velikostí trysky a výškou vrstvy, která je kolem 0,1 mm. Povrch je tak většinou hrubý, ale lze ho povrchově upravit obroušením, barvením nebo povlakováním.



Výhodou technologie FDM je rychlost tisku, jednoduchost, vznik minimálního množství odpadu a především cena, která je v porovnání s ostatními technologiemi nižší. Další výhodou tisku FDM je možnost použití různých materiálů současně. V tiskárnách FDM lze nastavit více vytlačovacích trysek s plněním různých materiálů, takže tištěné části mohou být při navrženém složení multifunkční [69, 72, 73].



Obr. 38: Detail 3D tisku vrstva po vrstvě FDM technologií [74].

Kompozity vyztužené vlákny pomocí FDM dokážou zesílit mechanické vlastnosti 3D tiskových dílů. Nicméně, orientace vláken, vazba mezi vlákny a matricí a tvorby vzduchových pórů jsou hlavní problémy, které vznikají při 3D tisku kompozitní díly [75, 76]. Další nevýhodou tiskáren FDM je to, že použitelný materiál je omezen na termoplastické polymery s vhodnou viskozitou taveniny. Ta by měla být dostatečně vysoká, aby poskytovala strukturální podporu, ale také dostatečně nízká, aby umožnila vytlačování. Někdy i odstranění nosné struktury (podpory tištěného dílu) použité během tisku může být obtížné [73].

Při výrobě kompozitů vyztužených vlákny se používají kompozitní filamenty. Na trhu existuje mnoho dostupných kompozitních filamentů a výběr závisí na uživateli. K dostání jsou filamenty s uhlíkovými, skleněnými nebo aramidovými vlákny a nylonovou, ABS (akrylbutadienstyren) nebo PLA (Polyactic Acid) matricí. Vlákná způsobují v materiálu vyšší tuhost, lepší tepelnou odolnost a rázovou houževnatost. Snižují také teplotní roztažnosti materiálu matrice, což má za následek snadnější a uživatelsky příznivější tisk součástí.

V oblasti 3D tisku kompozitů vyztužených nekonečnými vlákny existuje na trhu jediný výrobce, společnost Markforged. Jedná se o výrobce, který využívá nylonovou matrici v kombinaci s uhlíkovými, skleněnými a aramidovými vlákny. 3D tiskárny Markforget pracují na podobném principu jako FDM. Tiskárna obsahuje dvě trysky, jedna je stejná jako u ostatních zařízení FDM a tiskne pouze plastový filament. Druhá tryska je upravena pro potřeby tisku kompozitních vláken. Jako matrice čili vstupní materiál, slouží vlákna s termoplastovým povlakem. Z extrudéru jsou vlákna pomocí podávacích válců zavedena do trysek, ve kterých



se povlak taví. Následně jsou vlákno a matrice vytlačeny na tiskovou podložku. Firma Markforged má tuto metodu patentově chráněnou [70].

## 6.2 Současné trendy 3D tisku polymerních kompozitů v medicíně

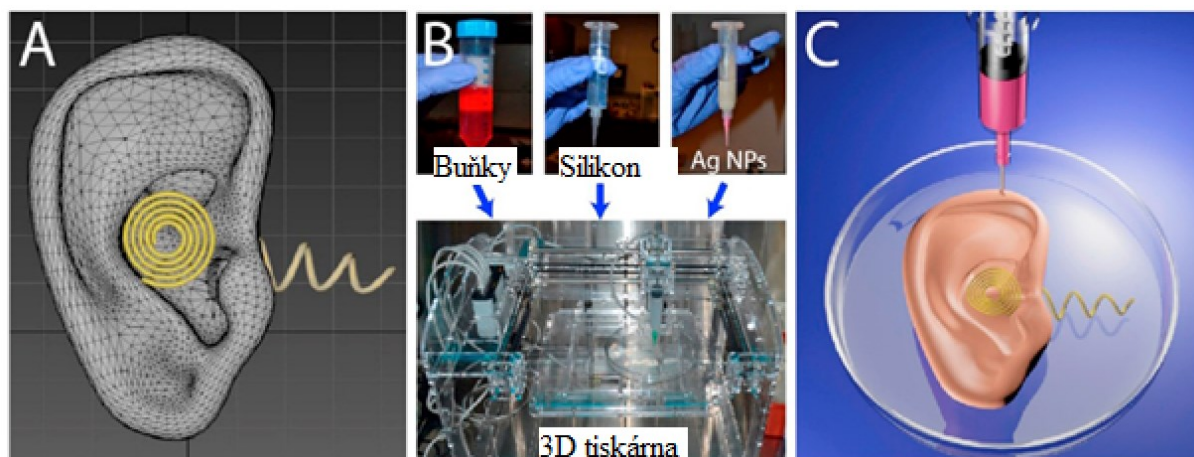
Polymerní materiály, které se v současné době používají pro tisk v oblasti biomedicínských aplikací, jsou založeny na přirozeně odvozených polymerech (želatina, alginát, kolagen atd.) Nebo na syntetických molekulách polymeru polyethylenglykol (PEG), kyselina poly-mlečná-glykolová (PLGA), polyvinylalkohol (PVA) atd. Mezi požadované vlastnosti tiskových materiálů pro biomedicínské aplikace patří tisknutelnost, biokompatibilita, dobré mechanické vlastnosti a strukturální vlastnosti [76, 77].

V oblasti biotisku došlo během posledních dvou desetiletí k významnému pokroku, kdy se zvýšil počet technických publikací na toto téma z pouhé 1 publikace v roce 2001 na více jak 50 publikací v roce 2018 podle Web of Science a Google Scholar.

Např. biotisk náhradních orgánů má potenciál řešit velký nedostatek vhodných orgánů pro transplantace. I takových orgánů, které by byly vyrobeny z buněk samotného pacienta. Snížilo by se tak riziko jejich odmítnutí. Tímto tématem se zabývá **Huang (2017)**. V současné době je nejvýznamnější technologií biotisku tisk pomocí bioinkoustů. Ten se používá k tisku živých buněk, od buněk z vaječníku křečka až po lidské fibroblasty, běžné buňky lidského těla. Až do teď ale nikdo nezkoumal, jak se bioinkousty chovají, když opustí trysky biotiskárny. Ale pokrok jde tak rychle kupředu, že tisk orgánů „na míru“ je jen otázkou času [78, 79].

Mnoho měkkých tkání lze považovat za hydrogel kompozitů vyztužených vlákny, jako je kloubní chrupavka. Nedávno byl vyvinut jednostupňový proces tisku hydrogelních kompozitů. Umělá hydrogelová menisková chrupavka byla úspěšně vytištěna, aby se prokázala potenciální biologická aplikace této složené struktury v reálném světě [80].

Biofabrikace využívající živé buňky k transplantaci tkání a orgánů je další novou aplikací 3D tištěných polymerních kompozitů v biomedicínském průmyslu. Několik tkání a orgánů, jako jsou uši, aortální chlopně, chrupavky a jaterní tkáně, již byly úspěšně vytištěny. **Lee (2019)** použil 3D bioplotter pro tisk ucha se složitou strukturou, která se skládá z PCL a buněčně nasyceného hydrogelu. Tištěné bionické kompozitní ucho splňuje očekávání jak geometrie, tak anatomie nativního ucha. Postup tisku ucha je předmětem obr. 39 [76, 81, 82].

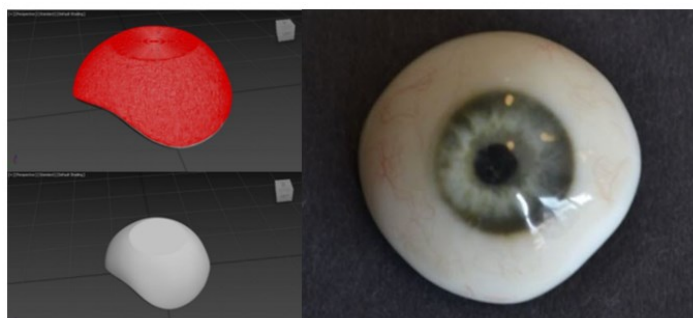


Obr. 39: Aditivní výroba bionického ucha; CAD-kresba bionického ucha (A), použité materiály k vytvoření bionického ucha 3D tiskem (B), ilustrace 3D vytištěného bionického ucha (C) [81].

**Lee a Freiberg (2019)** dosáhli v tomto odvětví zásadního průlomu, kdy pomocí magnetické rezonance získali detailní 3D snímky lidského srdce. Data pak byla použita pro 3D tisk, nazýván jako systém FRESH, který je významný tím, že tiskne buňky v roztoku kolagenu. Kolagen následně utuhne a vytvoří potřebný „scaffold“. Aby se kolagenové „lešení“ při tuhnutí nedeformovalo, tiskne systém FRESH kolagenovou síť s buňkami v lázni ze speciálního vyztužovacího gelu. Ten je pouze dočasný. Po vytvoření hotového výtisku se z něj gel odstraní zahřátím na teplotu lidského těla. Tímto způsobem byly vytištěny např. funkční malé srdeční komory nebo srdeční chlopně. Tímto systémem lze tisknout i další orgány, jako jsou ledviny, játra nebo plíce. Vytištěné orgány ale zatím nejsou schopny nahradit nemocné orgány pacientů čekajících na transplantaci. Na vytvoření vytisknutého orgánu, např. srdce v životní velikosti jsou zapotřebí miliardy buněk. Proto je technologie FRESH využívána prozatím jako „záplata“ pro léčbu zranění [82].

**Vocílka (2018)** se u nás zase zabýval výrobou prototypu oční protézy pomocí 3D tisku. Sám je zrakově postižený, a tudíž nositelem ne příliš realistické oční protézy. Pro výrobu prototypu nové oční protézy oskenoval svou starší protézu na bázi PMMA (plexisklo). Model jádra protézy poté upravil v programu 3ds Max 2017 i s texturou, která byla vytvořena z fotografie oka. Jádro oční protézy se vytisklo na 3D tiskárně Stratasys J750 (technologie PolyJet) a zalilo akrylátem pro nezávadnost povrchu a realistický lesk oka. Model i výtisk oka lze pozorovat na obr. 40. Tato tiskárna, která zhotovuje plnobarevné, multimateriálové prototypy a díly v rámci jedné tiskové úlohy, je dosud jediná na světě. To se projevilo hlavně ve výrobě duhovky, která musí co nejvěrněji odpovídat barvě zdravého oka. Oční žilkování bylo

vytvořeno pomocí vyčesané červené bavlny. Proces 3D tisku celého oka trval zhruba hodinu a půl, oproti osmi hodinám, které jsou třeba na výrobu běžné oční protézy. Zatím se ale jedná o jednoduchý prototyp, kterému zatím chybí klinické testy a certifikace [83].



Obr. 40: Modifikace modelu oka (vlevo) a hotová protéza oka pomocí 3D tisku [83].

Další významné věci, které by se bez aditivní výroby neobešly, jsou např. kraniální (lebeční) implantáty, které vyžadují naprostou přesnost a díky 3D tisku anatomicky odpovídají reliéfu lebky. Další doménou Biomedical Engineering, s.r.o. se sídlem v Košicích jsou také maxilofaciální (obličejové) implantáty nebo náhrada mandibulární (čelistní) kosti. Jsou vyrobeny z titanové slitiny Ti64ELI (stupeň 23) technologií přímého kovového laserového slinování (DMLS - Direct Metal Laser Sintering). Aplikace porézní struktury napodobuje architekturu skutečné kosti. Aditivní výroba usnadňuje výrobu implantátů s porézní strukturou na povrchu a umožňuje vytvářet implantáty s fyzikálními vlastnostmi velmi podobnými lidské kosti. Porézní struktury mohou být vyráběny s různými geometrií, velikostí pórů a tloušťkou lamel. Na obr. 41 je ukázka náhrady spodní čelisti, která díky jedinečnému prodlužovacímu mechanismu je navržen tak, aby s pacientem „rostla“ [84].



Obr. 41: Mandibulární implantát vyrobený 3D tiskem [84].

Dále tato firma pod záštitou Technické univerzity v Košicích vyvíjí speciální implantáty (zátky) pro děti s rozštěpem dutiny ústní, které kvůli této vývojové vadě nejsou schopny vytvořit podtlak a napít se. Zátka ze speciálního polymeru se zavede těsně po porodu do obličejové části dítěte, a tak je schopno samo sát mateřské mléko. Další specialitou, která se vyvíjí, je polymerní materiál (použití termoplastu PEEK – polyetereterketon a HA – hydroxyapatit), který díky porézní struktuře za pomoci aditivní výroby dokáže nahradit část kosti. Vytisknutý polymer vyztužený vlákny je bioaktivní a má shodný modul pružnosti jako lidská kost. Zatím je výzkum ve fázi testování v králičích chovech na králících, kteří mají vadu kosti.

3D tisk není velmi užitečný jen při výrobě nejrozumnějších inertních implantátů a náhrad, ale pomáhá i při zhotovení protéz a kompenzačních pomůcek. Tyto výrobky mají jak zdravotní, tak estetickou funkci, tak jako např. designová ortéza na obr. 42 [85].



Obr. 42: Designová ortéza vyrobená aditivní technologií [85].

## 7 TECHNOLOGIE VÝROBY DUTÝCH KOMPOZITNÍCH DÍLŮ

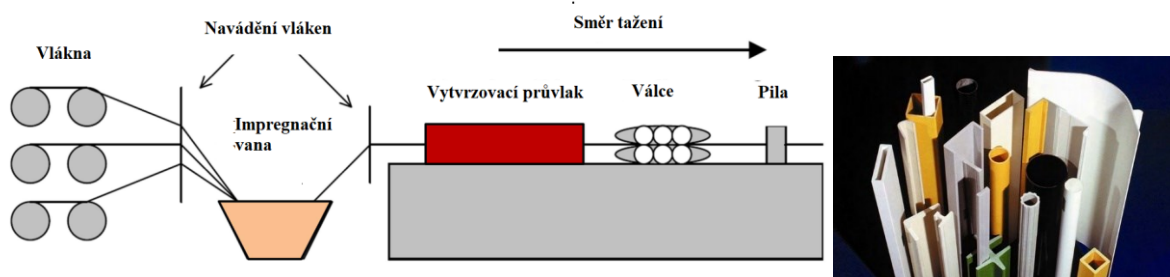
Vláknové kompozity, které vznikají až při výrobě samotného výrobku, lze vyrábět různými technologickými postupy. Technologický postup při výrobě vláknových kompozitů je velmi důležitým faktorem, který v podstatě určuje jak jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti, tak i ekonomiku výroby. Při volbě vhodného výrobního postupu má rozhodující úlohu výběr vlákna a matrice, délka, orientace a obsah vláken. U kompozitů s dlouhými vlákny je rozhodující technologie, která umožní orientaci. Volba technologie se řídí několika zásadními faktory, a to:

- Sériovostí a parametry výrobku,
- kvalitou povrchu,
- požadovanými vlastnostmi,
- limitem nákladů [16, 86].

Technologií, jak vyrobit duté kompozitní profily je několik. Musí se ovšem počítat stále s tím, že při výrobě kompozitního materiálu už zároveň vyrábíme požadovaný kompozitní díl. Musí se proto brát v potaz i to, že jádra nebo trny, na které bude kompozit nanesen, musí být snadno odstranitelné tak, aby se dodržel požadavek na dutý profil.

### 7.1 Pultruze (Pultrusion)

Pultruze neboli tažení, je osvědčeným kontinuálním výrobním postupem pro získání vysoce kvalitních profilů FRP s trvale opakovatelnými mechanickými vlastnostmi. Tato technologie je ideální pro výrobu různých tvarových plných nebo dutých profilů s konstantním průřezem a vysokým obsahem výztuže. Princip pultruze a výsledné profily je možné vidět na obr. 43.



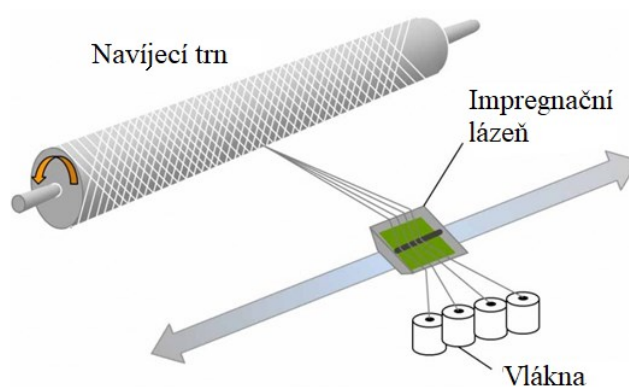
Obr. 43: Princip pultruze (vlevo) a profily vyrobené touto technologií (vpravo) [87, 88].

Vstupním materiálem jsou vlákna (roving, rohože) vedena přes impregnační vanu, ve které se nachází tekutá pryskyřice. Materiál je dále tažen přes vyhřívaný průvlak, kde vytvrzuje.

Vyhřívaný průvlak (hlava) je vlastně forma, která má otvor ve tvaru budoucího profilu. Proces se řídí hydraulicky. Na konci výrobní linky bývá nekonečně dlouhý profil nařezán na požadované délky pilou s diamantovými nebo nitridovými kotouči. Při výrobě dutých profilů pultruzí je součástí linky trn, který vede délkou formy. Výztuž nasycena pryskyřicí se táhne kolem trnu, čímž se vytvoří dutina. Jedná se ale o technicky velmi náročný proces, protože vycentrovat dutinu tak, aby měl výsledný profil všude stejnou tloušťku stěny není jednoduché. Trn samozřejmě technologii prodražuje. Výsledné díly zhotovené pultruzí jsou velmi kvalitní. Některé vlastnosti jsou dány výběrem vláken, jiné výběrem pryskyřice. Záleží na požadavcích budoucího kompozitního dílu [87, 89].

## 7.2 Navíjení (Winding)

Navíjení patří mezi nejjednodušší a nejprogresivnější metody k výrobě dutých kompozitů ze všech strojních procesů. Princip této metody lze vidět na obr. 44. Kontinuální, pryskyřicí impregnovaná vlákna nebo pramence jsou navíjeny na rotační trn ve tvaru výrobku, což poskytuje maximální kontrolu nad umístěním vlákna a uniformitu struktury. Při mokré metodě vlákno zachycuje pryskyřici s nízkou viskozitou buď průchodem skrz žlab, nebo z odměrného aplikačního systému. Při suchém způsobu je vyztužení napuštěno pryskyřicí před navinutím. Trny se pak dají vyjmout. Celý proces je řízen počítačem. Tradičně se používá k výrobě válcových a kruhových profilů, např. chemických a palivových zásobníků a potrubí, tlakových nádob a raketových motorů, trubek, a také tvarové díly jako přílby nebo hnací hřídele [90].



Obr. 44: Princip technologie navíjení. [90]

Výhodou této metody je, že výsledné produkty nemají žádné délkové limity. Pro tuto metodu je vstupní materiál ekonomicky dostupný. Výrobky mají skvělé fyzikální vlastnosti. Vysoké



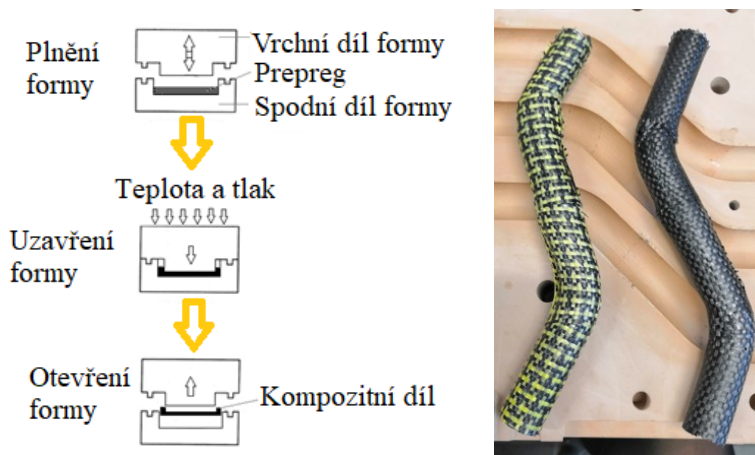
pořizovací náklady navíjecího stroje, oddělení trnu od výrobku a nízká produktivita patří mezi negativa.

Existuje i alternativa navíjení, a to technologie oplétání. Rozdíl je jen v tom, že je zde jádro statické a kolem něj rotuje oplétací zařízení. Touto metodou se dají vyrábět i tvarově zakřivené objekty jako kolena trubek nebo tenisové rakety [8, 90, 91].

### 7.3 Lisování prepregů (PCM - Prepreg Compression Molding)

Princip této metody (obr. 45) spočívá v tom, že tkanina je pryskyřicí nasycena předem, tzv. předimpregnována. Tomuto materiálu se zkráceně říká PREPREG. Prepregy mají přesně daný objem pryskyřice, vkládají se do formy, na kterou jsou kladeny vysoké požadavky přesnosti a kvality povrchu.

Pro výrobu dutých dílů se musí prepreg navinout na jádro, které se po vytvrzení odstraní. Výsledné mechanické vlastnosti produktu jsou ovlivněny jak počtem vrstev tkaniny, tak typem tkaniny. Po uložení tkaniny do formy se forma zavře a zabezpečí proti otevírání. Poté se nechá za tepla vytvrdit v elektrickou peci. V peci dosahuje teplota až 155°C. Je důležité po celou dobu procesu udržovat tlak ve formě. Doba vytvrzování na vytvrzovací teplotě a následné podmínky chlazení jsou dány technickým listem pryskyřice, která je v prepregu obsažena.



Obr. 45: Princip technologie PCM (vlevo) a duté profily vyrobené touto technologií (vpravo).

Výhoda lisování prepregu spočívá hlavně v jednoduše reprodukovatelnosti dílů a rychlosti výroby. PCM je vhodná spíše pro velkosériovou výrobu, protože náklady na výrobu formy bývají vysoké [92].

## 7.4 Ruční laminace (hand lay-up)

Tato technologie je založená na ručním kladení vrstev výztuže na sebe a jejich postupným prosycováním pryskyřicí za pomoci válečku. Výrobní proces ruční laminace se skládá z jednotlivých fází: ochrana formy (jádra) pomocí separátoru, nanášení gelového nátěru, nanesení pryskyřice na válec a následné pokládání výztuže (obr. 46) střídavě až do dosažení požadované tloušťky výrobku. Vytvrzení probíhá při pokojové teplotě a produkt se vyjme z formy nebo jádro z výsledného vytvrzeného profilu. Nevzhledné konce s roztřepenou tkaninou se po vytvrzení ořežou a zabrousí do požadované délky dílu.



Obr. 46: Výroba dutých kompozitů ruční laminací.



# PRAKTICKÁ ČÁST

## 8 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem dizertační práce je prozkoumat možnosti využití kompozitních materiálů, konkrétně polymerních vláknových kompozitů, jako náhrada tradičních materiálů pro použití v medicínských aplikacích. Jedním z cílů bude navrhnout vhodné materiálové složení a zpracovatelskou technologii výroby prototypu kompozitní části navržené pomůcky.

Experimentální část dizertační práce se zabývá návrhem designu nesouosého kompozitního dutého profilu pro zvolenou aplikaci, návrhem a ověřením mechanických vlastností kompozitního materiálu pro jeho výrobu, návrhem zpracovatelské technologie výroby pro výrobu prototypů nesouosých profilů, experimentální testování mechanických vlastností kompozitních prototypů dle modifikované metodiky zkoušky na vzpěr. Kontrola kvality prototypu byla zkoumaná vyhodnocením mikrostruktury jednotlivých prototypů na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) a taktéž na mikroskopu optickém. V softwaru Siemens NX 12 byla hodnocena stabilita kompozitních profilů pomocí MKP a hodnota kritické síly zatěžování profilu následně porovnána s hodnotou zjištěnou experimentálním testováním zkouškou na vzpěr.

V experimentální části jsme prozkoumali několik variant materiálových kombinací jak ve formě predimpregnovaných výztuží s definovaným objemovým zastoupením matrice, tak ve formě neprosycených tkanin a následnou impregnací technologií ruční laminace na předem 3D tiskem vyrobené jádro z ABS materiálu. Výhody a nevýhody zpracovatelských technologií výroby nesouosých profilů jsou předmětem diskuze v závěru dizertační práce.

V rámci spolupráce s fyzioterapeutickým centrem Sanatoria Klimkovice se v experimentální části dizertační práce věnuje inovaci stávajících nevyhovujících rehabilitačních a fyzioterapeutických pomůcek.

*Cíle dizertační práce:*

- Teoretické shrnutí aktuálního stavu dané problematiky polymerních vláknových kompozitních materiálů a jejich využití v oblasti medicíny;
- návrh inovace čtyřbodové hole, konkrétně těla hole (dutý kruhový profil) ve tvaru „labutí šíje“ (návrh materiálového složení, technického řešení a výrobní technologie);
- experimentální výroba vzorků prototypu části čtyřbodové hole zvolenou výrobní technologií;

- experimentální testování mechanických vlastností kompozitních prototypů podle modifikované metodiky zkoušky na vzpěr;
- hodnocení mikrostruktury vzorků pomocí SEM analýzy a analýzy metalografické;
- MKP analýza v softwaru Siemens NX 12, porovnání hodnot kritické síly zatěžování s experimentem;
- vyhodnocení dosažených výsledků, jejich vzájemné porovnání;
- ekonomické zhodnocení navrženého řešení;
- formulace dosažených výsledků a jejich využití pro vědu a praxi;
- závěr dizertační práce.

## 9 INOVACE LOKOMOČNÍ POMŮCKY - ČTYŘBODOVÁ HOLE

V rámci možné inovace dostupných kompenzačních pomůcek vznikla spolupráce s fyzioterapeuty a odborníky na rehabilitaci pacientů, kteří trpí disfunkcemi pohybu a spasticitou. Mezi jednu z nejčastěji používaných pomůcek patří i čtyřbodová podpůrná hole (obr. 47). Tento typ 474 je vyráběna anglickou firmou ROMA Medical.



Obr. 47: Duralová čtyřbodová podpůrná hole.

Stávající stav hole je zastaralý a v mnoha ohledech nevyhovující. Z tohoto důvodu byla pro inovaci vybrána právě tato kompenzační pomůcka. Parametry původní čtyřbodové podpůrné hole jsou zobrazeny v Tab. 4.

Tab. 4: Parametry duralové čtyřbodové hole [93].

Hmotnost hole [kg]	1,2
Max. únosnost hole [kg]	125
Nastavitelná výška hole [cm]	74-100
Nastavitelnost [cm]	2,5
Materiál konstrukce	Dural
Šířka podstavy [cm]	34

Požadavky na inovovanou holi:

- lehčí konstrukce,
- stabilnější konstrukce,
- vyšší únosnost hole (150 – 200 kg),
- větší variabilita nastavitelnosti výšky konstrukce,
- pohodlnější madlo,
- design hole.

Před samotným návrhem vylepšení této lokomoční pomůcky bylo nejprve nutné ověřit, zda neexistuje stejné řešení, jaké je zamýšleno s novou holí, která bude navržena v kompozitním provedení. Proto dalším logickým krokem bylo zajistit výpis z patentového úřadu.

## 9.1 Rešerše patentů a užitných vzorů hole

V současnosti existuje několik typů podpurných čtyřbodových holí, které slouží ke zvýšení stability pacienta v průběhu léčby. Jejimi předchůdci jsou hole třibodové a berle. Jejich funkce je založena na podpoře chůze pacienta. Hole čtyřbodová je dále doplněna o čtyři stabilní body v kontaktu s podložkou. Díky tomu je zajištěna dostatečná stabilita při víceosém zatížení.

Jednotlivé hole se od sebe liší:

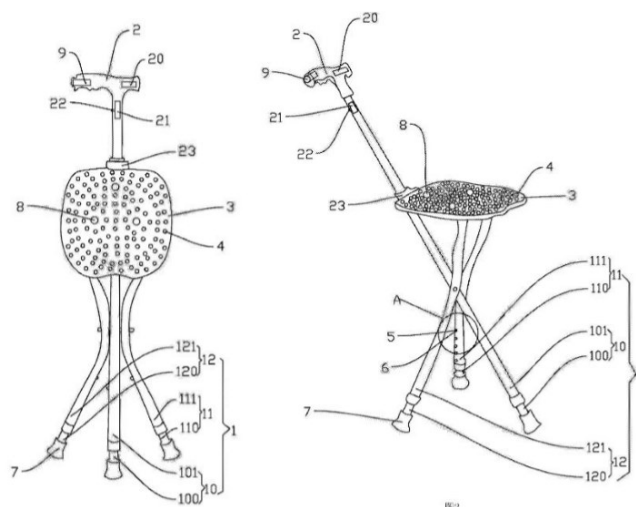
- konstrukcí rukojeti,
- materiály,
- konstrukcí čtyřbodového spojení a
- celkovou hmotností.

Z hlediska požadavku na léčbu za pomoci fyzioterapeuta je důležitá celková stabilita hole, hmotnost hole, výšková nastavitelnost, nastavitelnost rukojeti na míru pacienta. Dosud známé čtyřbodové hole tuto variabilitu nenabízí a jejich celková hmotnost je příliš vysoká. Níže jsou uvedeny dokumenty rešerše na stav techniky.

- CN207400442 (U) – *Ortopedická vycházková hůl se sedátkem*

Užitný model uvádí, že ortopedická vycházková hůl patří do technické oblasti lékařských nástrojů, jejichž součástí je kombinovaná noha obsahující mobilní výložník s lavicovou

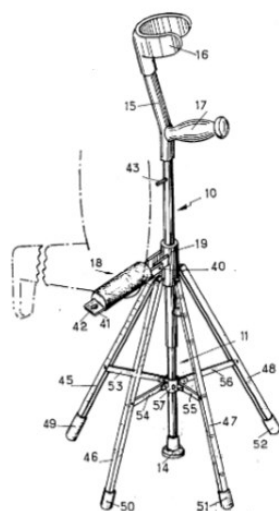
plochou. Povrch lavice je vybaven masážními výčnělky. Technické schéma na obr. 48 ukazuje, že užitečný model vycházkové hole má tedy jak funkci hole, tak funkci sedátka [94].



Obr. 48: Technické schéma ortopedické vycházkové hole; složená hole (vlevo), rozložená hole s funkcí sedátka (vpravo) [94].

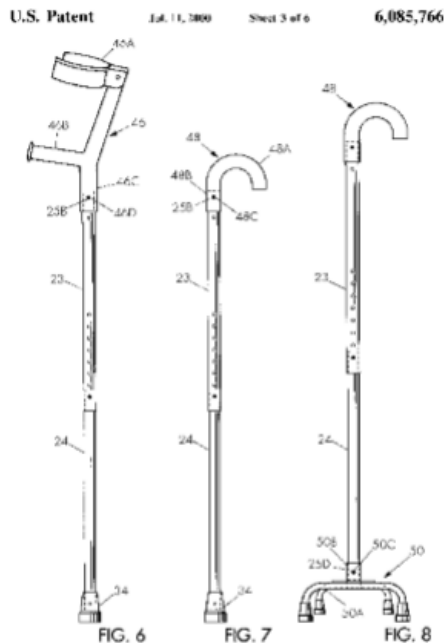
- US3999565 (A) – *Vycházková ortopedická hůl*

Toto ortopedické zařízení (obr. 49), které má základ ve francouzské holi, lze pro potřeby zraněných nebo postižených pacientů nohou rozložit na holi s pětibodovou podstavou [94].



Obr. 49: Technické schéma ortopedické vycházkové hole s možností rozložení [94].

Dále se ve výpisu z patentů a užitečných vzorů nacházejí spíše jednobodové podpůrné prostředky. Jedná se např. o *hliníkovou trubkovou berli* (US3157187 (A)) nebo o *berli s ozubeným systémem* (US6085766 (A)), jejíž schéma lze pozorovat na obr. 50 [94].



Obr. 50: Technické schéma ortopedické vycházkové hole s možností rozložení [94].

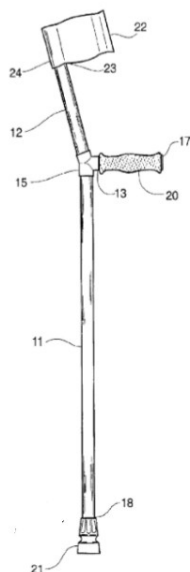
Kompenzační pomůcka výše je velmi variabilní. Díky teleskopickému tělu, odnímatelné rukojeti, odnímatelné podpěře podpaží nebo vyměnitelné podstavě může být vynález snadno převeden z berle plné velikosti na berle předloktí, nebo hůlku. Konec hole může být opatřen pouze jednobodovým hrotem nebo stabilnější čtyřbodovou podstavou.

- CN201986845 (U) - *Berle vyrobená z kompozitního materiálu z uhlíkových vláken*

Užitný model se týká berle, jejíž tělo je vyrobené z uhlíkového kompozitního materiálu (nebo skleněných vláken). Rukojeť berle je spojena s horním koncem těla berle lepidlem z epoxidové pryskyřice. Berle vyrobená z kompozitního materiálu z uhlíkových vláken má nízkou hmotnost, vysokou pevnost, atraktivní vzhled a je odolná proti únavě a korozi [94].

- USH2138 (H) - *Francouzská předloketní berle z kompozitního materiálu*

Kompozitní předloketní berle je odolná a lehká díky použití epoxidové matrici vyztužené uhlíkovými vlákny v kombinaci s komponenty z hliníkové slitiny. Patentové schéma berle je zobrazeno na obr. 51 [94].



Obr. 51: Užitený model francouzská předloketní berle z kompozitního materiálu [94].

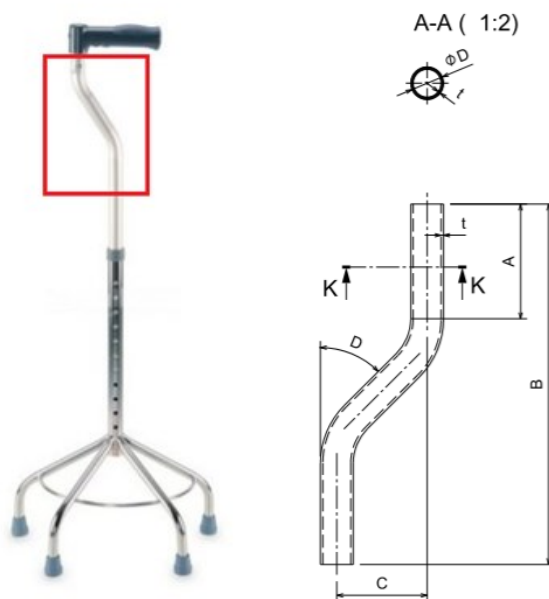
- CN106626431 (A) - *Opěrná berle vyrobená z lehkého kompozitního materiálu*

Vynález popisuje opěrnou podpažní berli, určenou k chůzi, vyrobenou z lehkého kompozitního materiálu (uhlíkový nebo skleněný kompozit). Tato pomůcka měla vyřešit nedostatky existujících podpažních berlí, které mají relativně vysokou hmotnost [94].

## 9.2 Návrh a výroba dutých kompozitních profilů

Kvůli inovaci čtyřbodové podpůrné hole bylo nutné konkretizovat její materiálové a s tím související technologické řešení, aby byl splněn požadavek odlehčení, vyšší únosnosti a přijatelnějšího designu. Kritickou částí pro návrh hole v kompozitním provedení se stala nesouosá část dutého tyčového profilu ve tvaru „labutí šíje“, která se nachází hned pod rukojetí hole. Zakřivená část je tvarově vyhovující, protože lépe přenáší zatížení pacienta do podstavky hole a tlumí nárazy při jejím používání, na rozdíl od hole s rovným tělem. Pro správnost materiálové varianty kompozitního provedení bylo nezbytné tyto segmenty nejdříve vyrobít a poté ověřit jak mechanicky, tak pomocí výpočetní techniky. Zamýšlená inovovaná část hole, dále dutý kompozitní profil a jeho výkres prezentuje obr. 52. Rozměry navrženého profilu jsou pak uvedeny v Tab. 5.





Obr. 52: Vybraný segment hole pro materiálovou inovaci [93, vlastní zdroj].

Tab. 5: Rozměry navrženého kompozitního prototypu.

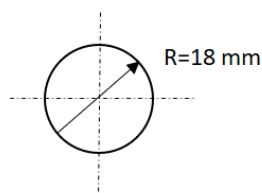
A	B	C	Ø D	D	t
60 mm	200 mm	55 mm	45 °	21 mm	1,5 mm

Prototyp bylo nutné vyrobit s co nejnižšími náklady, proto se zvolila varianta výroby vzorků svépomocí, a to laboratorně dostupnými a relativně levnými zpracovatelskými technologiemi. Na výrobu dutých profilů byla zvolena metoda lisování prepregu ve formě (PCM) a také metoda ruční laminace. Tyto konvenční způsoby výroby byly doplněny o metodu nekonvenční, a to výrobu vzorků pomocí 3D tisku.

Aby mohla být vytvořena dutina kompozitních profilů, bylo nezbytné nejdříve vyrobit jádro, na které by byl kompozitní materiál před vytvrzením nanesen. Jádro se po vytvrzení vzorků odstraní. Tím vznikne dutý kompozitní profil, který neobsahuje zbytečné spoje, jež vzniknou výrobou profilu z více částí a jejich následným lepením k sobě.

### 9.2.1 Návrh a výroba jader pro duté kompozitní profily

Prvním krokem celého procesu je návrh jádra, konkrétně jeho průměru. Průměr byl zvolen tak, aby odpovídal průměru dutiny původní duralové čtyřbodové hole, aby porovnání bylo co nejobektivnější. Průměr jádra byl tedy navržen na 18 mm, jak znázorňuje obr. 53.



Obr. 53: Návrh průřezu jádra dutého profilu.

Celkem bylo 3D tiskem vytvořeno 24 jader pro dvě technologie zpracování kompozitních profilů ve dvou materiálových variantách. Model jader byl vytvořen v programu CATIA V5, uložen ve formátu STL a předán k vytištění.

### 9.2.2 3D Tisk jader

Tisk jader probíhal na UTB Zlín v Ústavu výrobního inženýrství, kde je možný tisk z vymyvatelného polymeru akrylonitrilbutadienstyrenu (ABS). Pro tisk z ABS bylo nutné použít tiskovou podporu kompatibilní s tímto materiálem. Takovým materiálem je houževnatý polystyren, tzv. HIPS. Vlastnosti obou tiskových filamentů jsou uvedeny níže v Tab. 6.

Tab. 6: Vlastnosti tiskových filamentů ABS a HIPS [95, 96, 97].

Materiál	ABS	HIPS
Teplota tisku [°C]	210-250	200-250
Rozpusťnost	Aceton	Lemonesol
Teplotní odolnost [°C]	98	95
Teplota podložky [°C]	100-110	100-110
Smršřtivost během ochlazování	Ano, nutná regulace rychlosti chlazení	Ano, nutná regulace rychlosti chlazení
Aplikace	Automotiv, LEGO	Podpory pro tisk ABS
Výhody	Vysoká pevnost, rázová houževnatost, tuhost	Manuálně odstranitelná podpora

- *ABS*

ABS je velmi pevný a všestranný materiál s výbornou tepelnou odolností. Je vhodný pro vnitřní i venkovní použití. Velkou výhodou je jeho nenasákavost a zdravotní nezávadnost.

ABS je termoplast, což znamená, že může být opakovaně roztaven a krystalizován, aniž by došlo k znehodnocení materiálu. Vyšší teplota tání dává ABS excelentní tepelnou odolnost, kdy výtisky nebudou vykazovat známky deformace až do 98 °C. ABS je odolný vůči kyselinám, hydroxidům nebo uhlovodíkům. ABS obsahuje příměs syntetického kaučuku, díky tomu je odolnější proti opotřebení a nárazům. A v neposlední řadě je filament z ABS rozpustný v acetonu, což má výhodu např. u spojení více výtisků dohromady. Stačí pouze potřít kontaktní plochu acetonem a přiložit díly k sobě. Navíc se dá díky acetonovým výparům výtisk vyhladit do vysokého lesku. Je to ideální materiál pro výrobu funkčních prototypů a koncových produktů ve strojírenství. Známou nevýhodou ABS je nízká odolnost proti UV záření [95, 96, 97].

- *HIPS*

HIPS je velmi odolný termoplastický polystyren, který má podobné vlastnosti jako ABS. Obsahuje butadienový kaučuk jako přísadu pro zvýšení odolnosti proti nárazům. Jde o velmi univerzální a stabilní materiál se skvělou tepelnou odolností a produkuje velmi hladké přechody vrstev. HIPS je rovněž velmi tvárný materiál a je rozpustný v limonenu. Skvěle se hodí pro tisk mechanických součástí a podpor pro výtisky ABS a vzhledem ke svým fyzikálním vlastnostem je široce využíván třeba v obalovém a potravinářském průmyslu [95, 96, 97].

Filamenty obou použitých Materiálů si lze prohlédnout na obr. 54. Oba materiály se vyrábí v nejrůznějších barevných škálách, od bílé, přes oranžovou až po modrou. Obr. 54 koresponduje s barvami, které byly na výtisk jader a jejich podpor reálně použity.



Obr. 54: Tiskové struny ABS (vpravo), HIPS (vlevo) [98].

Jádra z ABS, jejichž vnitřní struktura byla kvůli úspoře materiálu navržena jako voštinová, se tiskla na HIPS podpory. Pro 3D tisk pak byla použita tiskárna Stratasys Dimension SST 768 (obr. 55), která je ve vlastnictví Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, ústav výrobního inženýrství. Tiskárna pracuje pouze na principu FDM a k tisku se používá především filamenty ABS. Technické parametry tiskárny jsou uvedeny v Tab. 7.

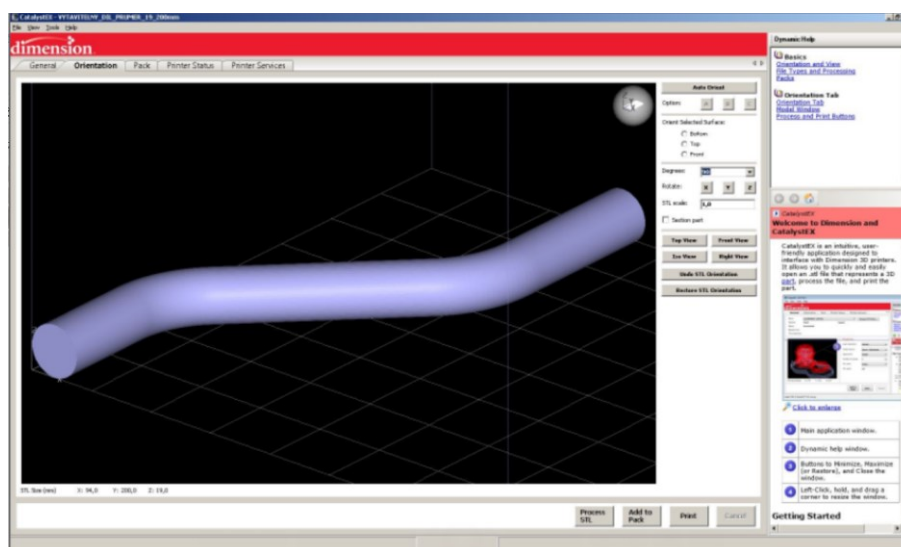
Tab. 7: Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Dimension SST 768 [99].

Rozměry tiskového prostoru [mm]	203 x 203 x 205
Průměr tiskové struny; tl. vrstvy [mm]	1,75; 0,254
Množství materiálu v zásobníku	922 cm <sup>3</sup> (0,95 kg)



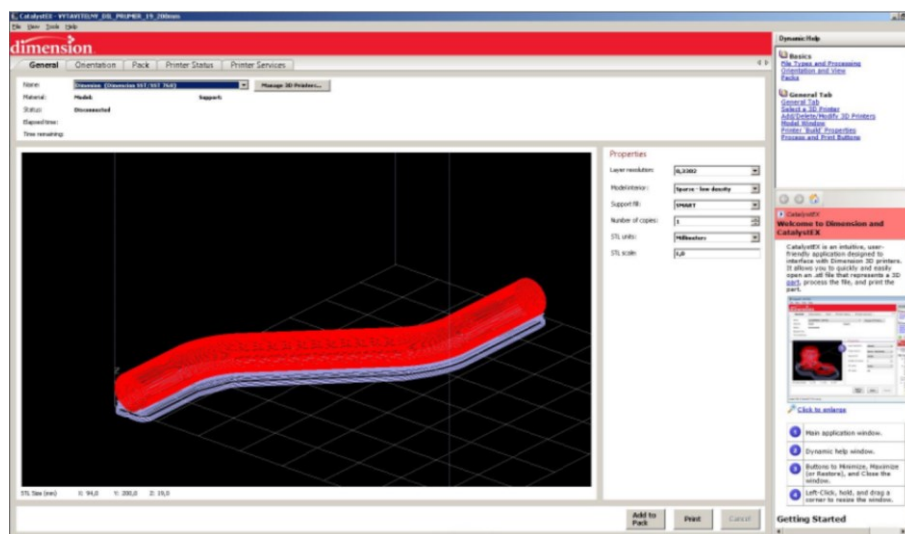
Obr. 55: 3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768.

Parametry jádra, jako velikost vrstvy, výběr podpor, nastavení voštiny a měřítka, byly nastaveny v softwaru CatalystEX, který je součástí 3D tiskárny. Prostředí tohoto softwaru lze vidět na obr. 56 a 57, kde na obr. 56 je ukázán model jádra a nastavení jeho parametrů.



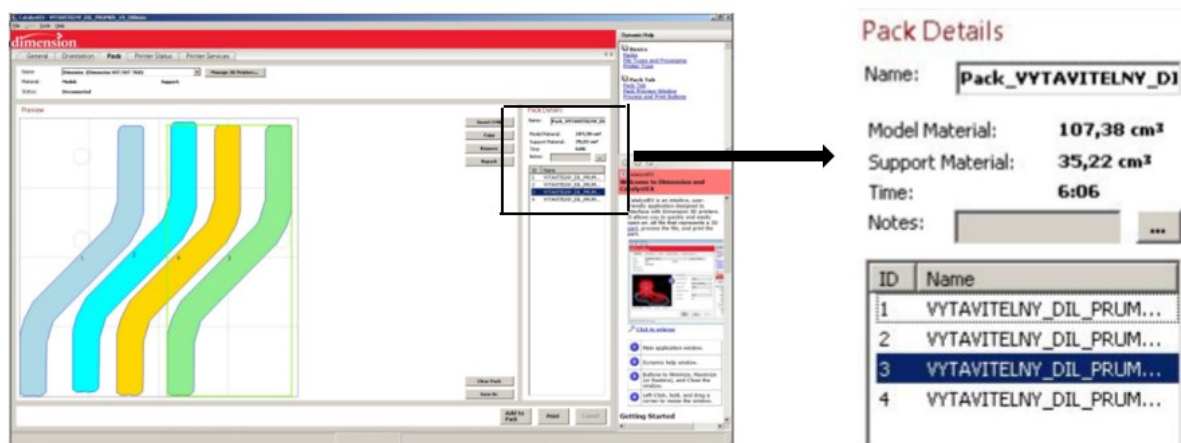
Obr. 56: Nastavení parametrů jádra pro tisk.

Po nastavení parametrů samotného jádra je nutné nastavit i parametrů tiskové podpory pro tisk jader (obr. 57).



Obr. 57: Nastavení parametrů tiskové podpory pro tisk jader.

Rozložení tisknutých jader na tiskové podložce a informace o tisknutých komponentech se opět nastavuje v softwaru CatalystEX (Obr. 58). Na pravé straně pracovní plochy se nachází tabulka, kde jsou vypsané hodnoty jako objem potřebného materiálu jader a podpor nebo čas tisku.

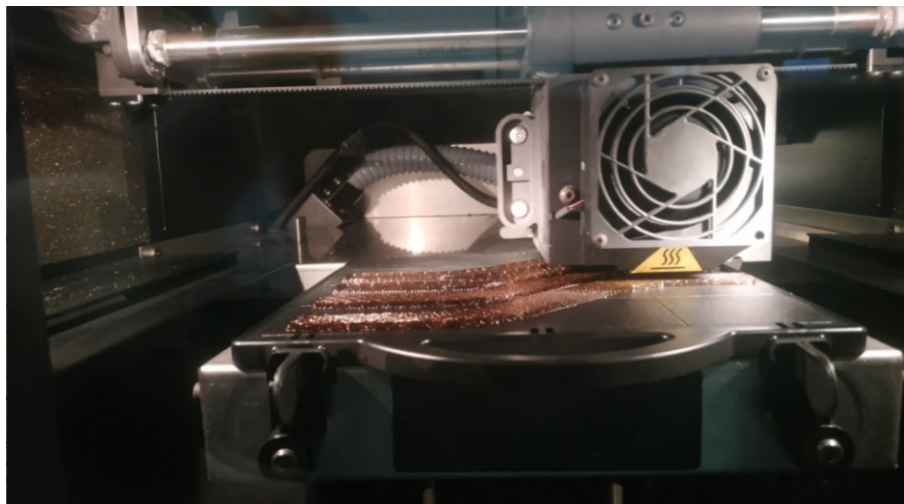


Obr. 58: Rozložení tisknutých jader na tiskové podložce (vlevo), parametry spotřeby materiálu a čas tisku (vpravo).

Z informační tabulky vyplývá, že na tisk čtyř jader bude potřeba 107,38 cm<sup>3</sup> polymeru ABS a na tisk čtyř podložek z polystyrenu HIPS 35,22 cm<sup>3</sup> materiálu. Čas tisku byl pak spočítán na 6 hodin a 6 minut. Vyrobit bylo ale nutné 24 kusů jader, proto se objem materiálu spotřebovaného na tisk jader a podpor znásobí šestkrát, tj. dohromady 644,28 cm<sup>3</sup> použitého

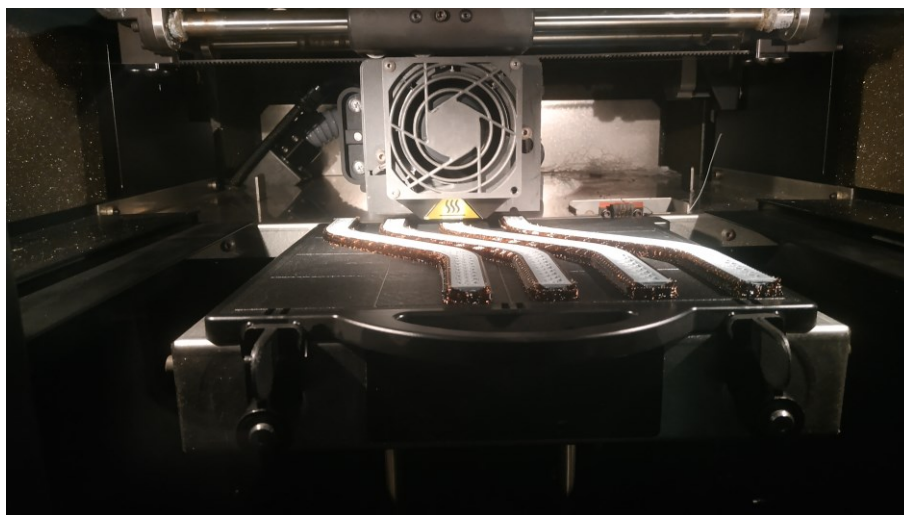
materiálu na jádra a 211,32 cm<sup>3</sup> na podpory. Tisk 24 jader má pak celkově trvat 36 hodin a 36 min.

Průběh tisku jader je možné si prohlédnout na následujících obrázcích. Obr. 59 dokumentuje tisk podpor z HIPS.



Obr. 59: Tisk podpor z HIPS.

Na obr. 60 je pak vidět začátek tisku voštinové struktury jader na tiskové podpory a na obr. 61 se nachází již hotová sada jader v podporách na tiskové podložce. Podpory od jader lze snadno oddělit manuálně.



Obr. 60: Průběh tisku jader na tiskové podpory.



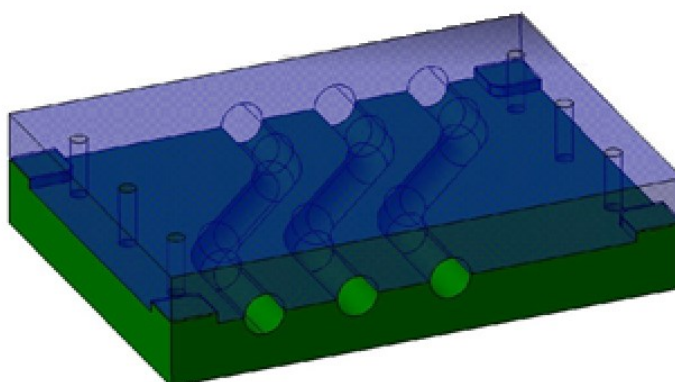


Obr. 61: Vytisknutá ABS jádra na podporách z HIPS a tiskové podložce.

### 9.2.3 Návrh a výroba formy pro dutý kompozitní profil

Dalším krokem k výrobě dutých kompozitních dílů byla výroba formy. Pro účel výroby kruhových dutých profilů z prepregu se jako nejlepší volba jevílo použití dvoudílné formy, kdy přítlak obou částí na vložené vzorky zajistí přesný tvar profilu. Forma byla navržena pro vytvrzení celkem 3 dílů v jednom vytvrzovacím cyklu. Rozměry formy byly dány délkou ABS jader dutých dílů. Výkresy spodního a horního dílu formy jsou obsaženy v příloze 1 a 2.

Model formy v softwaru CATIA V5 je znázorněn na obr. 62.



Obr. 62: Model formy z necuronu pro lisování kompozitních profilů.

Pro výrobu formy byl zvolen finančně dostupný a snadno opracovatelný polyuretanový materiál s obchodním názvem Necuron 651, tzv. umělé dřevo. Materiál se dodává ve formě desek. Je vhodný pro prototypové modely a lehce opracovatelné formy. Technický list necuronu je pak uveden pod přílohou 3.

Samotná výroba formy proběhla v laboratoři integrity konstrukcí a designu materiálu (Structural Integrity & Material Design - SIMD), která je jednou z laboratoří Centra pokročilých inovačních technologií, jež je součástí VŠB-TU Ostrava. Části na výrobu formy byly ořezány na pásové pile. Frézování konečného tvaru obou dílů formy včetně otvorů pro usazení vzorků bylo provedeno na vysokorychlostním 5osém CNC obráběcím centru HAAS VF-2YT (obr. 63). Po frézování byl výrobek očištěn tlakovým vzduchem. Parametry CNC HAAS VF-2YT jsou obsaženy v Tab. 8.



Obr. 63: CNC centrum HAAS VF-2YT (vlevo) a frézování formy na tomto CNC stroji (vpravo) [100, vlastní zdroj].

Tab. 8: Parametry CNC centra HAAS VF-2YT [100].

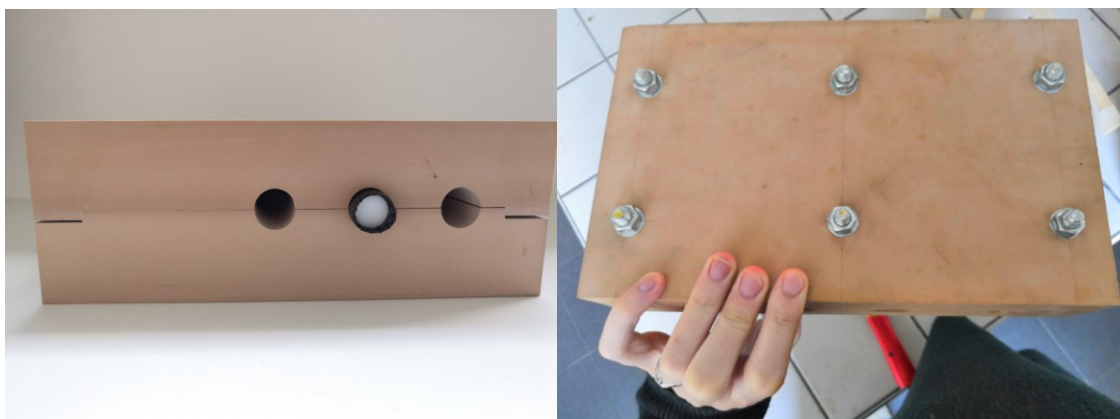
Název CNC přístroje	CNC HAAS VF-2YT	
Dráhy pojezdu vřetena [mm]	X	762
	Y	406/508
	Z	508
Rozměry stolu (d x š) [mm]	914 x 457	
Maximální zatížení stolu [kg]	1361	
Otáčky vřetena [ot/min]	8100	
Max. výkon motoru vřetena [kW]	22,4	
Max. obrábění [m/min]	16,5	



Oba díly formy jsou vzájemně zajištěny tvarovými zámky a pomocí šroubových spojů pro ještě pevnější spojení. Konečná podoba otevřené dvoudílné formy je ukázána na obr. 64. Formu po uzavření a zajištění šrouby si je možné prohlédnout na obr. 65.



Obr. 64: Spodní a horní díl formy.



Obr. 65: Uzavřená forma (vlevo), forma zajištěna šrouby (vpravo).

Forma při vytvrzování musí odolávat zvýšené teplotě, tj. vytvrzovací teplotě pryskyřice obsažené v prepregových materiálech (viz. kapitola níže). Proto je důležité, aby byla řádně prošroubována, nekroutila se a tím nedošlo k deformaci vytvrzovaných vzorků.

Další podkapitoly se budou věnovat výrobě samotných zkušebních prototypů. První typ zkušebních prototypů bude vyroben z prepregů lisováním za tepla a tlaku, druhý typ pomocí ruční laminace. Třetí sada vzorků bude vyrobena pomocí aditivní technologie, 3D tiskem.

### 9.2.4 Výroba dutých profilů lisováním prepregů

Technologie lisování prepregů za tepla a tlaku již byla zmíněna v teoretické části. Pro výrobu dutých profilů se vybraly dva druhy prepregů od společnosti GRM systém s.r.o., Olomouc. Uhlíkový prepreg GG 160 P/45% naimpregnován epoxidovou pryskyřicí IMP503Z a hybridní prepreg (kombinace uhlíkových a aramidových vláken) SIGRAPREG® H W170-PL1/1-E320/45%, obsahující epoxidovou pryskyřici E320. Ukázky prepregů lze vidět na obr. 66.



Obr. 66: Uhlíkový prepreg (vlevo) a hybridní prepreg (vpravo) na výrobu kompozitních vzorků.

Tyto prepregy byly vybrány z důvodu nižší teploty vytvrzování, která je třeba vzhledem k výběru materiálu formy. Základní parametry obou materiálů jsou uvedeny v Tab. 9.

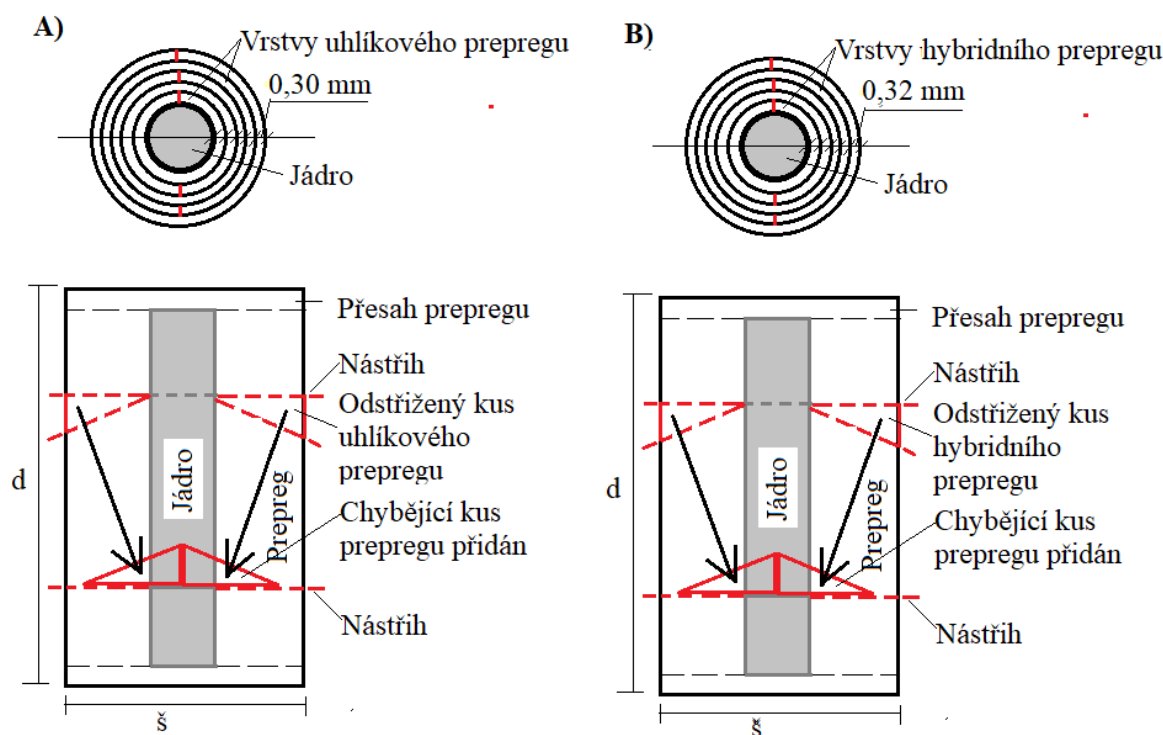
Tab. 9: Vlastnosti výztuže prepregu.

Vlastnosti výztuže prepregu	Uhlíkový prepreg	Hybridní prepreg
Obchodní označení	GG 160 P/45%	H W170-PL1/1-45%
Plošná hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	160	170
Obsah vláken v prepregu [%]	55	55
Vazba tkaniny	plátnová	plátnová
Kompatibilní pryskyřice	Epoxid IMP503Z	Epoxid E320
Tloušťka vrstvy prepregu [mm]	0,3	0,32

Aby byly vzorky patřičně vytvrzeny, musí se teplota pece řídit vytvrzovacím grafem pryskyřice obsažené v jednotlivých prepregích. Celé technické listy obou materiálů jsou součástí přílohy 4, 5 a 6. V příloze č. 5 je uveden samostatný technický list epoxidové pryskyřice pro uhlíkový prepreg.

### Množství použitého materiálu

Tloušťka vrstvy uhlíkového prepregu je 0,30 mm a hybridního prepregu 0,32 mm. Tzn. že na dosažení tloušťky stěny profilu o tl. 1,5-2 mm (přibližně jako duralová hůl) je možné docílit položením 5-ti vrstev tkaniny na vnitřní jádro. Výpočet použitého materiálu k výrobě kompozitních profilů závisí na ploše vrstev, které postupně obalují vnitřní jádro. Rozvinutím jeho plochy se zjistilo, že nanesení kompozitní tkaniny na jádro se neobejde bez průstřihů. U prvního ohybu se vrstvy prepregu částečně překrývají, u spodního ohybu kousek materiálu zase chybí. Bylo tak nutné vytvořit nástřihový plán a schéma vrstvení jednotlivých dílů prepregu na sebe, jak ukazuje obr. 67. Každá vrstva je ve výsledku obdélník, kdy se u jednoho ohybu vystřihne překrývající se části materiálu (trojúhelníky), které se přidávají na místa chybějícího prepregu. Každá vrstva prepregu je pak položena přes spoj vrstvy předchozí tak, aby se spoje střídaly a nedocházelo tak k velkému oslabení vzorku.



Obr. 67: Nástřihový plán a rozložení prepregu na jádro, A) uhlíkový prepreg, B) hybridní prepreg.


Každá z pěti vrstev prepregu, které se kladou na sebe, se liší v šířce. Délka zůstává stejná, 260 mm (délka jádra plus 5 mm přesah materiálu na každé straně jádra). Rozměry jednotlivých vrstev jsou uvedeny v Tab. 10.

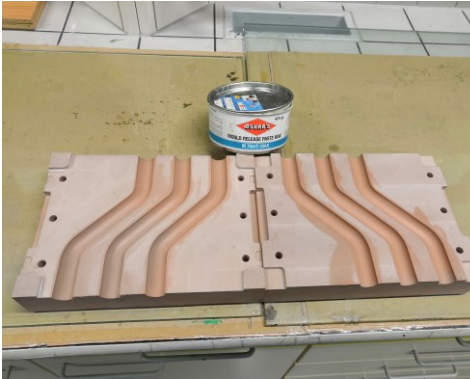

Tab. 10: Rozměry jednotlivých vrstev obou druhů prepregů.

Vrstva	1.	2.	3.	4.	5.
Uhlíkový prepreg š/d [mm]	56,6/260	58,4/260	60,3/260	62,2/260	64/260
Hybridní prepreg š/d [mm]	56,6/260	58,6/260	60,6/260	64,6/260	66,6/260

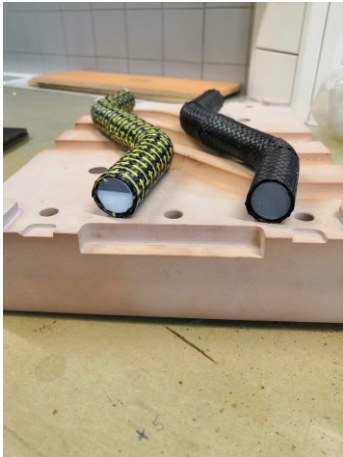


Shrnutí postupu výroby dutých profilů technologií PCM je uveden pro přehlednost v podobě tabulky (Tab. 11).

Tab. 11: Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ metodou lisování prepregů (PCM).

Č.O.	Popis operace	Fotodokumentace
1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Příprava prepregu (vyjmutí z mrazáku a den před aplikací ponechán při pokojové teplotě, aby nedošlo ke kondenzaci vlhkosti a tím ke zhoršení vlastností polotovaru),</li> <li>nastřížení jednotlivých vrstev prepregu podle nákresu po pěti vrstvách na jeden vzorek od každého druhu prepregu, viz obr. 59,</li> <li>obalení vymyvateľných jader vrstvami prepregu podle schématu vrstvení (není třeba separační fólie),</li> <li>vyrobena 6 vzorků s uhlíkovým prepregem a 6 vzorků s hybridním prepregem,</li> <li>časová náročnost cca 18 hodin.</li> </ul>	

2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Separace formy pomocí separátoru Oskar's M 700/C-WAX, (aplikace 3-4 nátěrů pomocí hadříku, časová prodleva mezi nátěry 5-10 min, každá vrstva vyleštěna ubrouskem),</li> <li>• vložení vzorků do formy,</li> <li>• utěsnění formy pomocí šroubů,</li> <li>• na přípravu formy pro jednu sadu vzorků (3 kusy) cca 1 hodina,</li> <li>• časová náročnost 12 vzorků / 4 hodiny.</li> </ul>	
3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vytvrzení vzorků v elektrické peci dle vytvrzovacího diagramu (příloha 5, technický list pryskyřice),</li> <li>• pec postupně nahřata na teplotu 125 °C (cca 2 °C/min),</li> <li>• při 110 °C utaženy šrouby formy, které můžou narůstající teplotou povolit),</li> <li>• vytvrzování na teplotě 125 °C 1 hodinu, poté je pec zchlazena na 40 - 50 °C,</li> <li>• forma se vzorky vyjmuta z pece a zchlazena při pokojové teplotě,</li> <li>• vytvrzení jedné sady vzorků (3 kusy) cca 3,5 hodiny,</li> <li>• časová náročnost 12 vzorků / 14 hodiny.</li> </ul>	



4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vytvrzené vzorky odformovány a připraveny k dalšímu zpracování (zařezání a zabroušení okrajů),</li> <li>• odformování jedné sady vzorků (3 kusy) asi 0,5 hodiny,</li> <li>• časová náročnost 12 vzorků / 2 hodiny.</li> </ul>	
5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vymývání jader pomocí acetonu,</li> <li>• na 12 vzorků pomocí PCM spotřebováno asi 5 litrů acetonu,</li> <li>• rozpouštění jednoho jádra cca 4 hodiny,</li> <li>• časová náročnost 12 jader / 48 hodin.</li> </ul>	
6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hotové kompozitní prototypy připravené k mechanickému zkoušení,</li> <li>• Průměrná hmotnost jednoho profilu - uhlíkový 27 g, hybridní 37 g,</li> <li>• celková doba operace na přípravu 12-ti kusů kompozitních profilů lisováním prepregů (6 uhlíkových a 6 hybridních) cca 86 hodin.</li> </ul>	

### 9.2.5 Výroba dutých profilů ruční laminací

Výhodou této metody je schopnost vyrábět i tvarově složitější komponenty v krátkém časovém intervalu s minimálními náklady, než je tomu u jiných technologií. Nevýhodou ručního kladení je požadavek na přesnost a zručnost obsluhy a nízká sériovost, která je ale v tomto případě žádoucí. Na výrobu dutých profilů byly vybrány tkaniny od firmy Fiberpreg CZ a.s. z řady produktů Kordkarbon. Jedná se o uhlíkovou tkaninu CC 160 P-100 a hybridní tkaninu CA 164 P-100. Technické listy obou tkanin jsou obsaženy v příloze 7 a 8. V Tab. 12 jsou uvedeny základní parametry použitých tkanin [2, 48].

Tab. 12: Parametry uhlíkové a hybridní tkaniny pro výrobu dutých profilů ruční laminací [16].

	Uhlíková tkanina	Hybridní tkanina uhlík/aramid
Vazba	plátno	Plátno
Plošná hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	160	164
Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	1,76	1,76/1,44
Specifikace vláken	HS 3K 200 tex	HS 3K 200 tex/ 2200 121 tex
Výrobce	Toray	Toray/Twaron
Kompatibilní pryskyřice	Epoxid	Epoxid
Tloušťka vrstvy tkaniny [mm]	0,28	0,30

Jako matrice byla zvolena kompatibilní epoxidová pryskyřice L 285. Pryskyřice se míchá s tužidlem v hmotnostním poměru 100:40. Specifikace pryskyřice i nejčastěji používaných tužidel jsou uvedeny v Tab. 13 a Tab. 14.

Neexistuje žádné psané pravidlo, kolik pryskyřice použít, aby došlo k dostatečnému prosycení vláken, a zároveň ji nebylo příliš. Z praxe je ale ověřeno, že pryskyřice se dává tolik, kolik váží suchá tkanina, plus 10 - 20 % navíc, kvůli ztrátám pryskyřice během procesu přípravy a výroby laminátu.

Pryskyřice L 285 se díky svým dobrým mechanickým a tepelným vlastnostem využívá v letectví, lodním průmyslu, modelářství nebo na výrobu forem a nástrojů [16].

Tab. 13: Specifické a mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice L 285 [16].

	<b>Laminační pryskyřice L 285</b>
Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	1,18 – 1,23
Viskozita [ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ]	600 – 900
Pevnost v ohybu [MPa]	110 – 120
Modul pružnosti v tahu [GPa]	3,0 – 3,3
Pevnost v tahu [MPa]	70 – 80
Pevnost v tlaku [MPa]	120 – 140
Vytvrzení	24 hodin / 23 °C, +15 hodin / 60 °C

Tab. 14: Specifikace nejpoužívanějších tužidel [16].

	<b>Tužidlo 285</b>	Tužidlo 286	Tužidlo 287
Hustota [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ / 25 °C]	0,94 – 0,97	0,94 – 0,97	0,93 – 0,96
Viskozita [ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ / 25 °C]	50 – 100	60 – 100	80 – 100

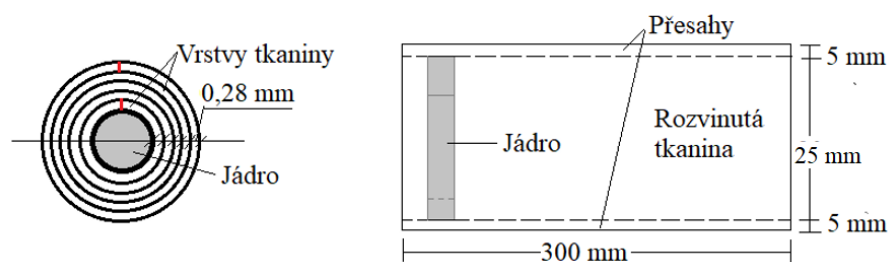
#### Množství použitého materiálu

Tloušťka vrstvy uhlíkové tkaniny je 0,28 mm a hybridní tkaniny 0,3 mm. Tzn. že na dosažení tloušťky stěny profilu o tl. 1,5-2 mm (přibližně jako duralová hůl) je možné docílit položením 5-ti vrstev tkaniny na vnitřní jádro.

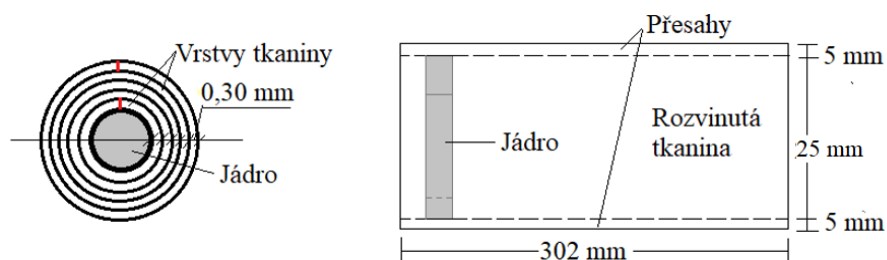
U ruční laminace nastřihání tkaniny na jednotlivé vrstvy a přeložení další vrstvy přes spoj vrstvy minulé jako v případě prepregů nepřipadala v úvahu, jelikož vrstvy na sobě díky postupnému vytvrzování pryskyřice nedržely. Ale díky snadné manipulaci a přizpůsobivosti plátňové tkaniny byla na vnitřní jádro nanесena jedna kontinuální vrstva rozměrově odpovídající celkové délce pěti vrstev pro dosažení požadované tloušťky stěny profilu. Jednoduchým výpočtem byla stanovena délka tkanin na 300 mm pro uhlíkovou tkaninu a 302 mm pro hybridní tkaninu. Šířka tkaniny je stejně dlouhá jako délka jádra, ke které je přičteno 5 mm přesahu na každé straně, aby mohl být vzorek po vytvrzení lépe upraven na přesnou délku jádra. Díky absenci nástřihů a průstřihů nemá tak laminát po své délce žádná místa, která by ho oslabovala a tím docházelo ke zhoršení mechanických vlastností.

Pro lepší představu je vše schematicky zakresleno na obr. 68 a 69.





Obr. 68: Schéma nástřihového plánu a navrstvení uhlíkové tkaniny na jádro.



Obr. 69: Schéma nástřihového plánu a navrstvení hybridní tkaniny na jádro.

Množství pryskyřice, kterou bude nasycena tkanina závisí na hmotnosti suché tkaniny. Tkaninu, která bude potřeba na obalení jádra se zváží, jako je ukázáno na obr. 70 pro případ tkaniny hybridní, a poté se vypočítá nutné množství matrice podle již zmíněného vztahu. Hmotnost pryskyřice se rovná hmotnosti suché tkaniny plus cca 20 % navíc (nasáknutí válečku, ztráta hmoty v míchací nádobě). Množství materiálu na výrobu jednoho vzorku ruční laminací je shrnuto v Tab. 15.



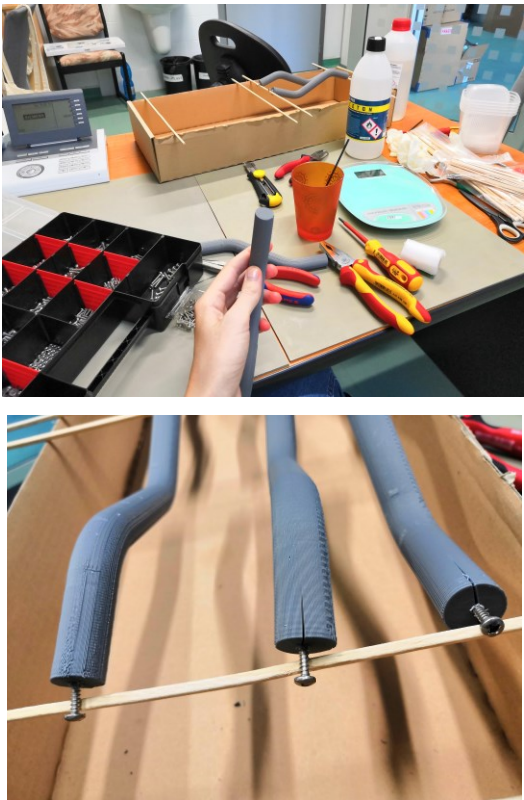
Obr. 70. Vážení suché tkaniny nutné k výpočtu množství pryskyřice.




Tab. 15: Množství materiálu (tkaniny, pryskyřice) na výrobu 1 profilu.

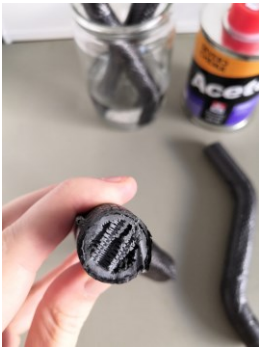



	Uhlíková tkanina	Hybridní tkanina uhlík/aramid
Váha suché tkaniny [g]	16	20
Váha pryskyřice + cca 20 % navíc [g]	20	24
Váhový poměr pryskyřice a tvrdidla 100 : 40 [g]	14,3 : 5,7	17,1 : 6,9

Stejně jako u výroby vzorků technologií PCM, i technologický postup ruční laminace je uveden v podobě přehledové tabulky, Tab. 16.

Tab. 16: Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ metodou ruční laminace.

Č.O.	Popis operace	Fotodokumentace
1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navrtání jader šroubky pro snadnější uložení při vytvrzování,</li> <li>• časová náročnost 12 profilů / 1 hodina.</li> </ul>	

2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Přichystání materiálu na obalení jader (uhlíková a hybridní tkanina, epoxidová pryskyřice a tvrdidlo),</li> <li>• laminační pryskyřice L 285, tužidlo 285.</li> </ul>	
3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jádro obaleno jedním kusem nasycené tkaniny dle nástrihového plánu (obr. 60 a 61),</li> <li>• uštířžený kus tkaniny (1 kus na 1 jádro) pomocí válečku nasycen epoxidovou matricí,</li> <li>• časová náročnost 12 vzorků / 4 hodiny.</li> </ul>	
4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hotová obalená jádra a uložena k vytvrzení při pokojové teplotě cca 24 hodin,</li> <li>• 6 kusů uhlíkových profilů,</li> <li>• 6 kusů hybridních profilů,</li> <li>• časová náročnost 12 vzorků / 24 hodin.</li> </ul>	

5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ořezání jader od přesahů tkaniny na 200 mm</li> <li>• vymývání jader v acetonové lázni,</li> <li>• na 12 vzorků vyrobených ruční laminací spotřebováno cca 5 litrů acetonu,</li> <li>• rozpouštění jednoho jádra cca 4 hodiny,</li> <li>• časová náročnost 12 jader / 50 hodin.</li> </ul>	 
6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hotové prototypy připravené k mechanickému zkoušení,</li> <li>• průměrná hmotnost 1 profilu – uhlíkový 23 g, hybridní 30 g,</li> <li>• celková doba operace cca 79 hodin /12 profilů.</li> </ul>	 

### 9.2.6 Výroba dutých profilů 3D tiskem

Třetím způsobem výroby prototypů dutých kompozitů je nekonvenční metoda 3D tisku. Výtisky jsou lehké, odolné a geometricky přesné. Pro tisk kompozitních prototypů, uskutečněná laboratoří ProtoLab v Ostravě, byla vybrána houževnatá onyxová matrice vyztužená uhlíkovými vlákny. Onyx je materiál, který se skládá z nylonu a mikrokarbonových vláken. Je až 1,4x pevnější než ABS. Pevnost onyxu se dále může zvyšovat výztuží v podobě kontinuálních vláken. Onyx je chemicky a teplotně odolný. Technický list matrice i uhlíkových vláken je součástí přílohy 9 [101].



Tisk profilů byl uskutečněn metodou FDM/FFF na 3D tiskárně Markforge X7 (obr. 71).

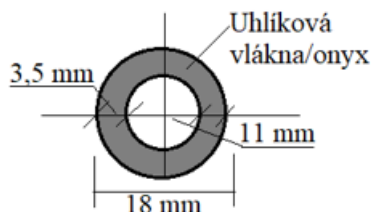


Max. rozměry součásti (X x Y x Z) [mm]	330 x 270 x 200
Výška vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	50-125
Nejvyšší pevnost výtisku v tahu [MPa]	700
Nejvyšší ohybová tuhost výtisku [ $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	51
Materiál matrice	Onyx, Nylon, Onyx FR
Materiál vyztužujících vláken	Kevlar, Karbon, Skelná vlákna

Obr. 71: 3D tiskárna Markforged X7 a její technické specifikace [101].

Tato tiskárna obsahuje zesílený dvou-tryskový systém, který podporuje tisk matrice a zároveň kontinuálních karbonových nebo dalších zpevňujících vláken. Laser skenuje během tisku součást, tak aby byla zajištěna co největší rozměrová přesnost [101].

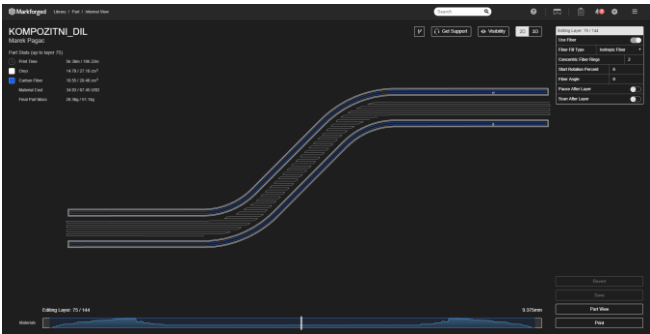
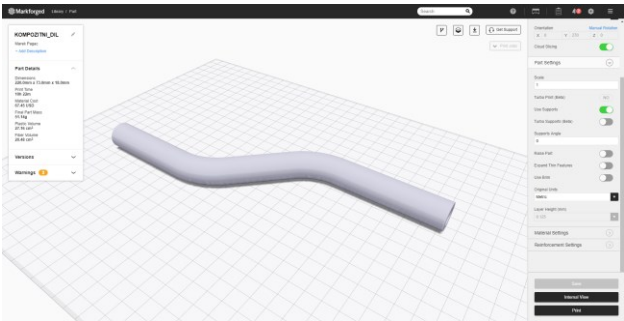
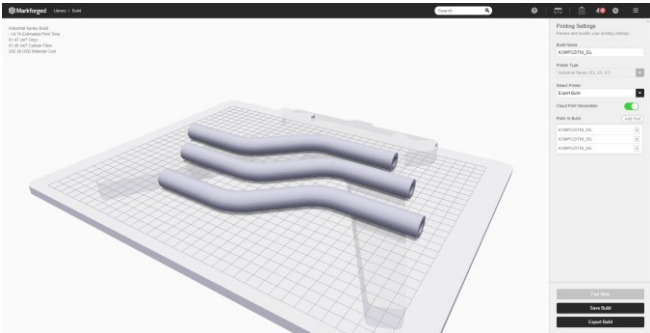
Oproti původnímu návrhu musel být tištěný prototyp co do rozměrů upraven. Bylo to dáno především ekonomickým hlediskem a možnostmi samotného tisku. Průřez vzorku se upravil na celkový průměr 18 mm, kdy nutná tloušťka stěny musela být min. 3,5 mm. Tloušťka musela být nastavena na tuto hodnotu z důvodu toho, aby se kruhový profil při tisku nepropadl a vyztužující vlákna byla dostatečně obalena onyxovou matricí. Schéma průřezu lze vidět na obr. 72.




Obr. 72: Schéma průřezu 3D tištěného profilu.

Technologický postup od návrhu po samotnou výrobu 3D tištěných vzorků je zahrnut pro přehlednost v Tab. 17.

Tab. 17: Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ 3D tiskem.

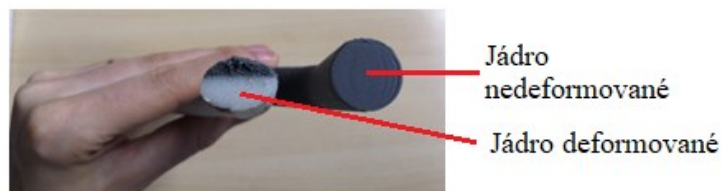
Č.O.	Popis operace	Fotodokumentace
1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>2D návrh kompozitního dílu v softwaru Eiger Markforged, který je příslušenstvím 3D tiskárny,</li> <li>zadání parametrů pro tvorbu 3D modelu,</li> <li>časová náročnost 0,5 hodiny.</li> </ul>	
2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vytvoření 3D modelu kompozitního prototypu v softwaru Markforged,</li> <li>časová náročnost cca 15 min.</li> </ul>	
3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rozložení 3D modelů na tiskovou podložku a nastavení tiskových parametrů,</li> <li>vrstva tisku byla nastavena na 0,125 mm,</li> <li>časová náročnost cca 15 min.</li> </ul>	

4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vytisknuté kompozitní prototypy,</li> <li>• tisk jednoho vzorku: 10 hod 22 min,</li> <li>• výška vrstvy: 0,125 mm,</li> <li>• počet vrstev: 144,</li> <li>• objem matrice: 27,16 cm<sup>3</sup>,</li> <li>• objem vláken: 20,48 cm<sup>3</sup>,</li> <li>• konečná hmotnost jednoho dílu 51,14 g,</li> <li>• časová náročnost na tisk 6 vzorků / vzorků 62 hod 22 min,</li> <li>• celková doba operace na přípravu 6-ti kusů kompozitních profilů vyrobených 3D tiskem cca 63 hod 22 min.</li> </ul>	
----	---	---

### 9.2.7 Defekty při výrobě dutých profilů

Při pokusu vyrobit první vzorky vznikly vadné vzorky. V dostupné literatuře nebyla nalezena žádná zmínka, jak vyrobit dutý zahnutý kompozitní profil. Než se podařilo najít správný technologický postup, probíhala výroba metodou „pokus-omyl“. Po mnoha úpravách a změnách v pracovní metodě se celý proces optimalizoval na možnou reprodukci dalších prototypů.

První defekty vznikly už při tisku jader, kdy kvůli příliš rychlému vyjmutí z tiskové komory jádra na koncích deformovala (obr. 73). U dalších jader došlo k delaminaci a odlupu tiskových vrstev ABS (obr. 74).

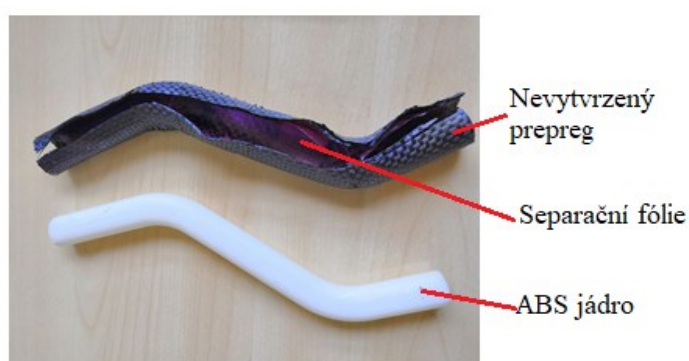


Obr. 73: Deformace ABS jader při 3D tisku.



Obr. 74: Delaminace a odlup tiskových ABS vrstev u 3D tištěných jader.

Další chyba v technologii nastala, když se jádro obalilo separační fólií a na fólii se vrstvily kusy prepregu. Separační fólie se v ohybech vlnila a bránila tak prepregu dokonale přilnout a přizpůsobit se tvaru jádra. Navíc byla separace fólií naprosto zbytečná, protože jádra se po vytvrzení vzorků vymyla acetonem. Vzorky se navíc dokonale nevytvdily, protože náběh na vytvrzovací teplotu byl příliš rychlý a teplota nedostatečně vysoká na prohřátí vrstev prepregu až k jádru. Na obr. 75 je ukázán nedostatečně vytvrzený vzorek se separační fólií, kdy prepreg šlo po vyjmutí z pece lehce rozříznout. Konzistence prepregu byla gumovitá.



Obr. 75: Nedostatečně vytvrzený vzorek vyrobený z uhlíkového prepregu.

Nedostatečně vysoká teplota (původně 110 °C místo nutné teploty 125 °C) a rychlé ochlazení mělo za následek i delaminaci jednotlivých vrstev prepregu. Delaminaci je nejvíce viditelná na průřezu vzorků, jak ukazuje obr 76.





Obr. 76: Delaminace vrstev prepregu, uhlíkový prepreg (vlevo), hybridní prepreg (vpravo).

Posledním viditelnou vadou při výrobě vzorků nastala při formování vzorků, kdy se nedokonalým vložením do dutiny formy dostal polotovar do dělicí roviny dvojdílné formy. Tam se kompozitní materiál skřípl a vytvořila se stlačená rýha po celé délce profilu. Defekt je viditelný na obr. 77.



Obr. 77: Defekt při chybném vložení vzorku do dutiny formy.

---

## 10 EXPERIMENTÁLNÍ A VÝPOČETNÍ ANALÝZA DUTÝCH KOMPOZITNÍCH PROFILŮ

### 10.1 Mechanické zkoušení dutých kompozitních profilů na vzpěr

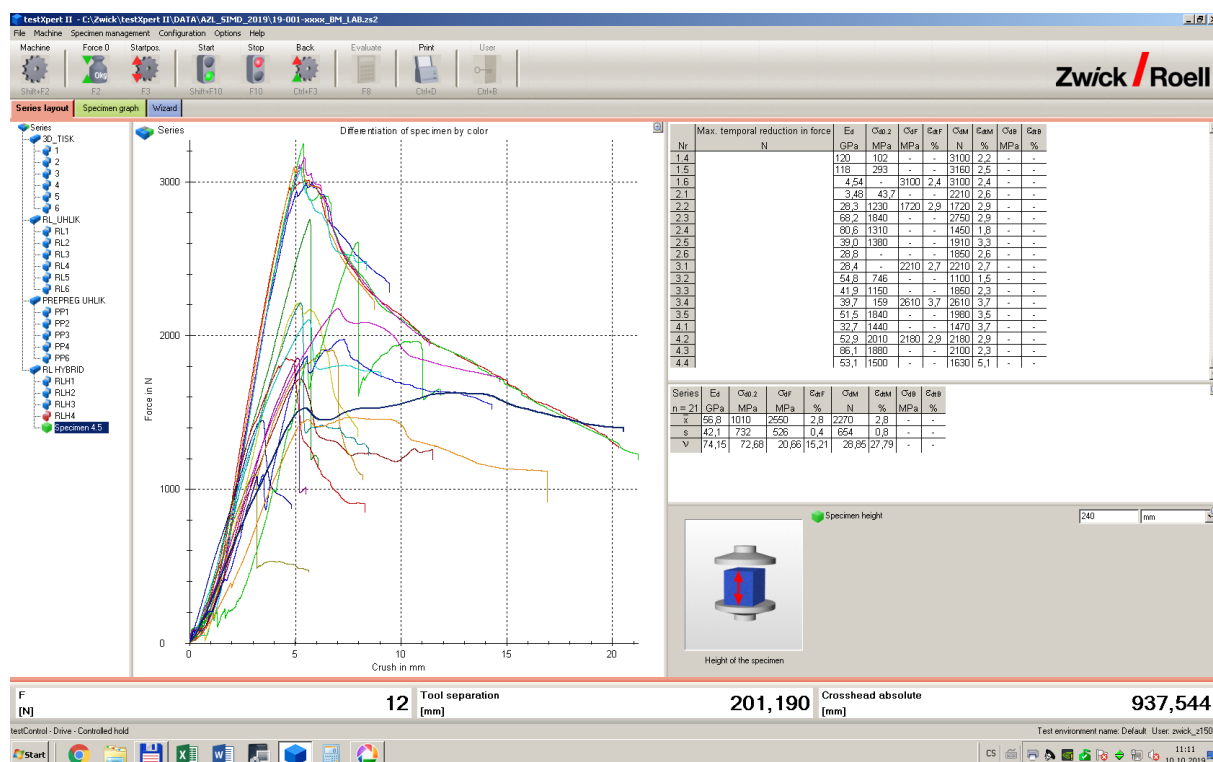
Podstatou mechanických zkoušek je zjistit, jak působí mechanické síly na zkoušený materiál. Vliv na chování kompozitů při mechanickém namáhání má především vytvrzení matrice, dále obsah a rozložení plniva (vláken). Mezi základní mechanické zkoušky v oblasti kompozitů patří zkoušky tahem, tlakem, tříbodovým a čtyřbodovým ohybem. Pro polymerní kompozity neexistují jednotné podmínky zkoušení kvůli jejich variabilní morfologii a chemickému složení; jsou normou upraveny jen rámcově. Proto se konkrétní metoda konkrétního materiálu řídí dle odborného uvážení s přihlédnutím k tomu, jakým způsobem bude budoucí výrobek po dobu svého užívání namáháný [2, 5, 102].

U některých konstrukcí se lze setkat s případy, kdy únosnost není kritická z hlediska pevnosti materiálu, ale z hlediska stability. Problematickou ztráty stability, která nejčastěji nastává při zatížení tlakem, ohybem, krutem nebo jejich kombinací, se zabývá stabilita konstrukcí. Stabilita se řeší nejčastěji u otevřených i uzavřených profilů nebo u tenkostěnných nosníků. Jedním ze základních případů stability, který se řeší nejčastěji, je tzv. vzpěr. Ke vzpěru dochází při zatížení štíhlého prutu tlakovou osovou silou. Tlak působí na vyztuženou vrstvu ve směru os vláken až dojde k porušení vlivem ztráty stability těchto vláken. Míra odolnosti vláken závisí na zvlnění vláken a úrovni mezifázové soudržnosti. Při dobré adhezi rozhraní vlákno – matrice nastává lom vlivem smyku (koordinované vybočení vláken po překročení kritické hodnoty zatížení), při špatné adhezi pak vlivem delaminace. Při zatížení tlakem je složité v celém zkušebním tělese udržet rovnoměrnou napjatost během celé zkoušky. Změna tloušťky stěny vzorku vede k rozdílu k v odolnosti vůči ztrátě stability [8, 11, 103].

Pro výpočet kritické síly nesouosých dutých profilů, tzv. geometricky imperfektních prutů, se využívá kombinace tlaku a ohybu. Zkouška na vzpěr patří mezi běžně používané mechanické zkoušky, které jsou založeny na deformaci zkušební vzorku tlakem pro zjištění kritické síly porušení stability. Zkušební těleso se upne do čelistí trhačího stroje, kde je zatěžováno konstantní silou, obvykle do porušení (zborcení struktury) [103].

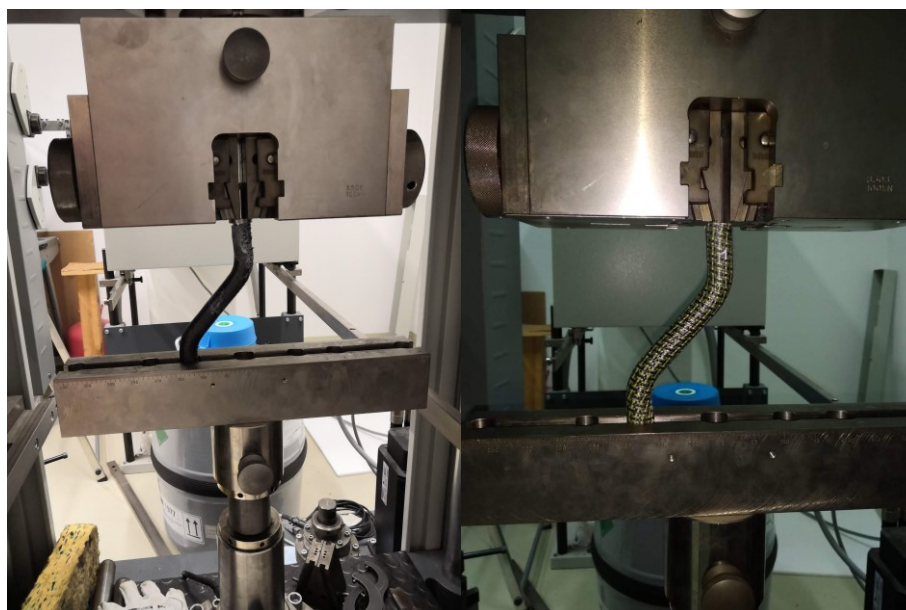
Zkouška na vzpěr kompozitních profilů byla provedena na trhačím stroji Zwick/Roell Z150 s maximální zatěžovací silou  $\pm 150$  kN, rozsahem zkušebních teplot  $-80$  °C– $300$  °C a snímači

protažení vzorku a rozevření. Pro potřeby zkoušení nesouosých prototypů bylo nutné vyrobit přípravek na jejich upevnění v trhačím stroji. Do spodní části byla umístěna speciální lavice s vyfrézovanými otvory o průměru shodném jako průměr vzorků. Do horních čelistí zkušebního stroje byla umístěna speciálně vytvořená objímka s trnem, na který byl vzorek nasazen. Trn byl zapuštěn 15 mm do dutiny vzorku, což mělo simulovat reálné uchycení rukojeti k tělu původní duralové hole. Zatěžování probíhalo rychlostí 5 mm/min pro každou sadu profilů, celkem tedy pro pět sad po 6-ti kusech vzorků. Výsledkem zkoušky na vzpěr byl pracovní diagram materiálu, což je křivka závislosti síly zatěžování na posunu profilu. Pracovní prostředí softwaru testXpert II. K trhačímu stroji Zwick/Roell Z 150 je ukázáno na obr. 78.



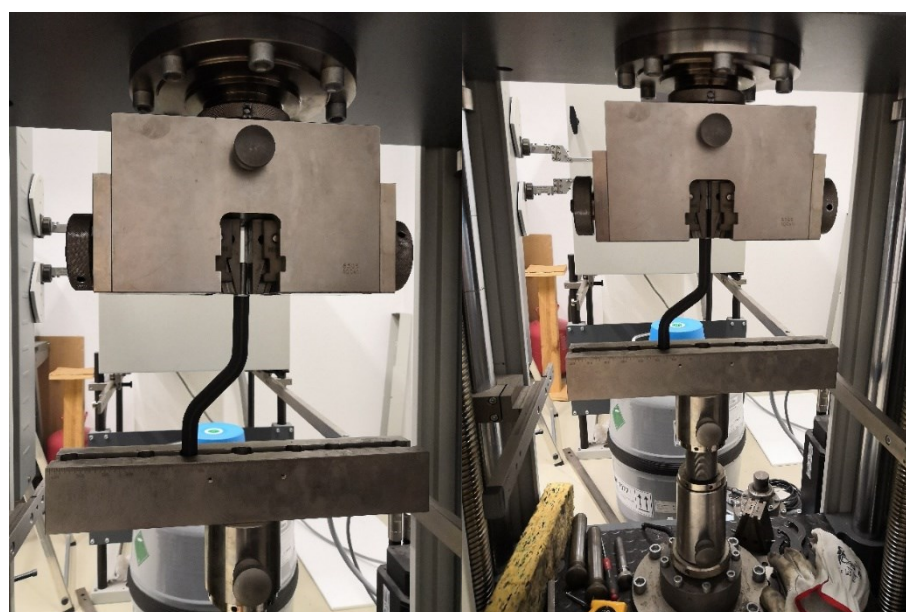
Obr. 78: Pracovní prostředí softwaru trhačího stroje Zwick/Roell Z150.

Zatěžování ručně vyrobených kompozitních profilů, které jsou umístěny ve spodní části stroje v na míru vytvořené ocelové lavici a v horní části stroje nasunuty na trn s objímkou, je možné sledovat na obr. 79. V průběhu zatěžování docházelo k ohybu vzorků v místě jejich zakřivení, avšak nedocházelo k viditelnému porušení struktury materiálu (vzniku trhlin, povrchovému porušení materiálu). Po odlehčení se profily vracely do téměř původního stavu, jako před zatížením.



Obr. 79: Zkouška na vzpěr ručně vyrobených kompozitních profilů; tlakové zatížení uhlíkového kompozitu (vlevo), zatížení hybridního kompozitu (vpravo).

Deformaci 3D tištěného uhlíkového vzorku vlivem tlaku prezentuje obr. 80. Vlevo je možné sledovat vzorek před deformací, vpravo pak v průběhu deformace.



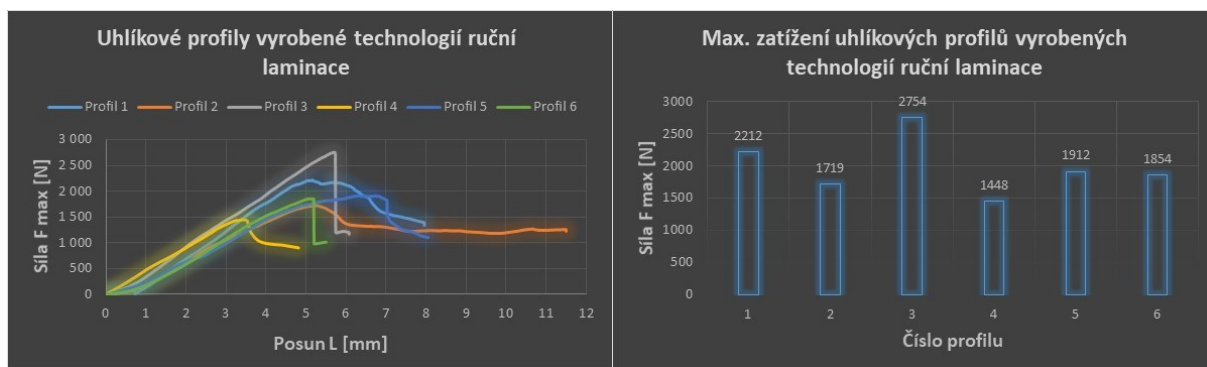
Obr. 80: Zkouška na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených 3D tiskem.

Výsledné hodnoty vzpěru kompozitních profilů byly vyhodnoceny jak graficky, tak statisticky.

### 10.1.1 Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr dutých kompozitních profilů

Výsledné hodnoty zkoušky na vzpěr jednotlivých profilů byly vyhodnoceny v programu Microsoft Excel. Pro grafické vyhodnocení se použily dva typy grafů. Spojnicový graf, který udává závislost maximální síly na posunu (stlačení) zkušebního profilu. Druhý sloupcový graf znázorňuje maximální sílu porušení pro jednotlivé profily konkrétního materiálové složení. Tím, že duté profily nemají tvar přímého prutu, ale jsou zakřivené, působila na ně jak síla vzpěru, tak ohybu. Při zkoušení byly profily tlakovou silou stlačeny. Deformace profilů nebyly na první pohled viditelné. Proto v tomto případě nebylo jasné, jestli došlo nejdříve ke ztrátě pevnosti nebo stability. Proto za maximální sílu porušení lze považovat i kritickou sílu porušení stability.

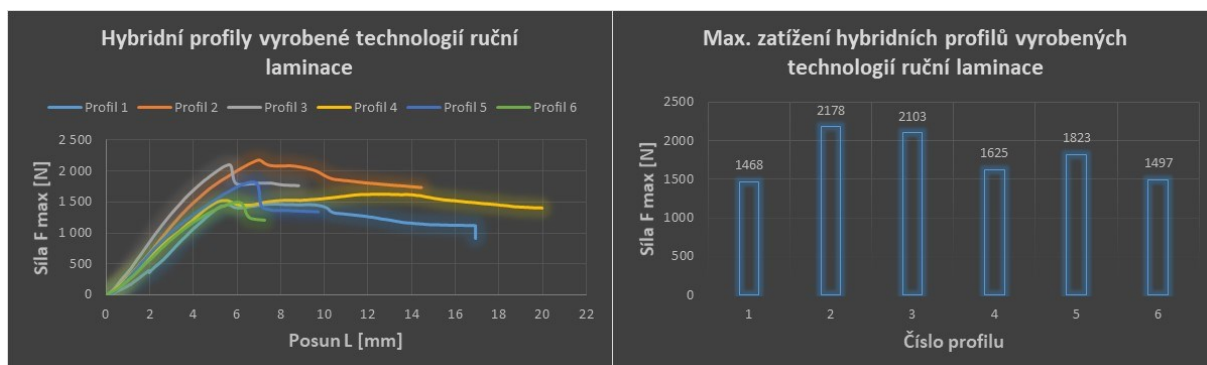
Na prvních dvou obrázcích níže jsou graficky vyhodnoceny profily vyrobené metodou ruční laminace. Uhlíkové profily na obr. 81 mají co do průběhu zkoušky obdobný trend, až na profil č. 4, který nedosáhl ani na 1500 N. Naopak nejvyšší hodnoty maximální síly dosáhl profil č. 3, který snesl zatížení až 2754 N. Stlačení vzorků se pohybovalo ve všech případech obdobně, mezi 5 a 6 mm.



Obr. 81: Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených ruční laminací; spojnicový graf závislosti maximální síly na posunu vzorku (vlevo), sloupcový graf maximálních sil jednotlivých profilů (vpravo).

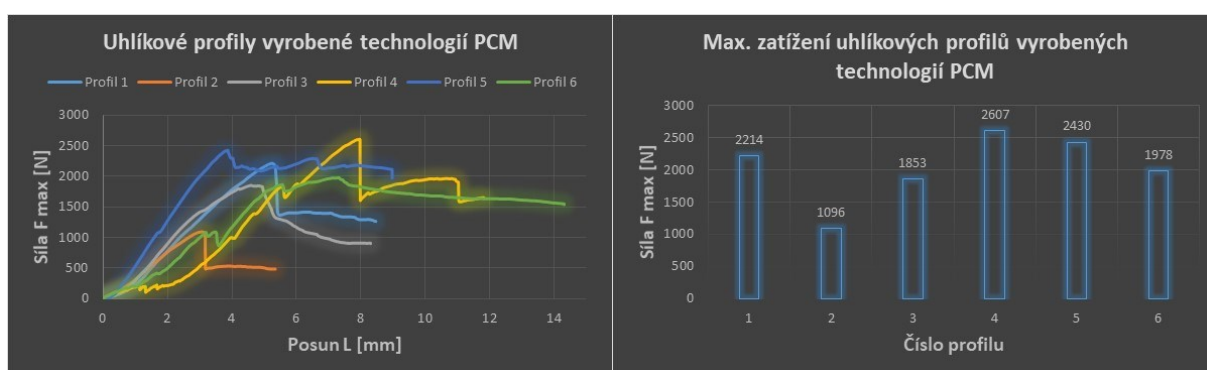
Hybridní profily vyrobené ruční laminací (obr. 82) měly průběh zatěžování obdobný jako u profilů uhlíkových. Křivky ztěžování byly v případě hybridních profilů více protáhlé, bez výraznějšího přechodu mezi nárustem zatížení a náhlým porušením. To je zapříčiněno s největší pravděpodobností aramidovými vlákny obsažené v hybridní tkanině. Tato vlákna jsou více houževnatá a snášejí lépe zatížení tlakem. I tak dva profily dosáhly maximální síly menší, jak

požadovaných 1500 N. Nejlepšího výsledku pak dosáhl profil č. 2, a to 2178 N. Rozpětí posunu vzorků se při zkoušce pohybovalo mezi 5 a 7 mm.



Obr. 82: Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr hybridních profilů vyrobených ruční laminací; spojnicový graf závislosti maximální síly na posunu vzorku (vlevo), sloupkový graf maximálních sil jednotlivých profilů (vpravo).

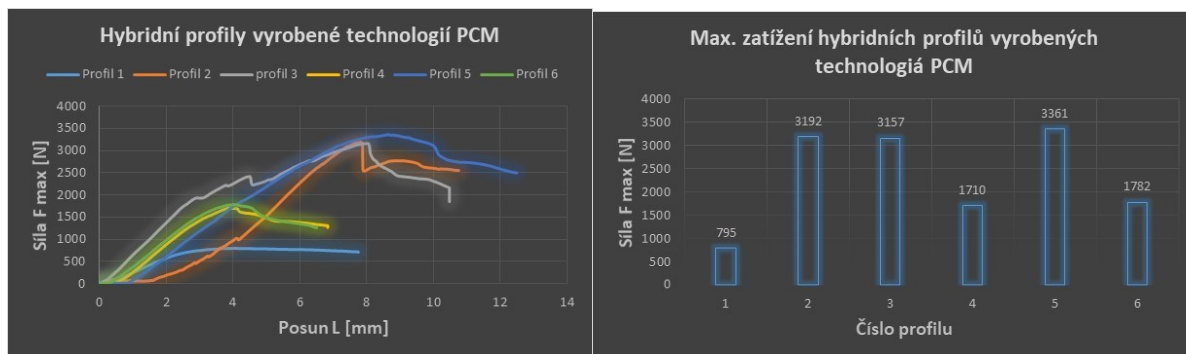
Vyhodnocení profilů vyrobených lisováním prepregů patří další dva obrázky. Obr. 83 prezentuje výsledky zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů. Na první pohled je zřejmé, že trendy křivek jednotlivých profilů se výrazně liší. Ač jsou prepregy průmyslově vyráběným materiálem s přesným množstvím matrice, která rovnoměrně prosycuje výztuž, zde spíše než materiál, hraje roli způsob vrstvení materiálu na jádro. Četné průstříhy a spoje oslabují kontinuitu profilu a stávají se z nich kritická místa pro vznik defektů. Nejnížší hodnoty maximální síly dosáhl uhlíkový profil č. 2, necelých 1100 N, nejvyšší hodnoty zatížení 2600 N měl profil č. 4. Posun jednotlivých vzorků byl zhruba mezi 3 až 5 mm. Jen profil č. 4, který měl při zatěžování cyklický průběh, dosáhl stlačení 8 mm.



Obr. 83: Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených lisováním prepregu; spojnicový graf závislosti maximální síly na posunu vzorku (vlevo), sloupkový graf maximálních sil jednotlivých profilů (vpravo).

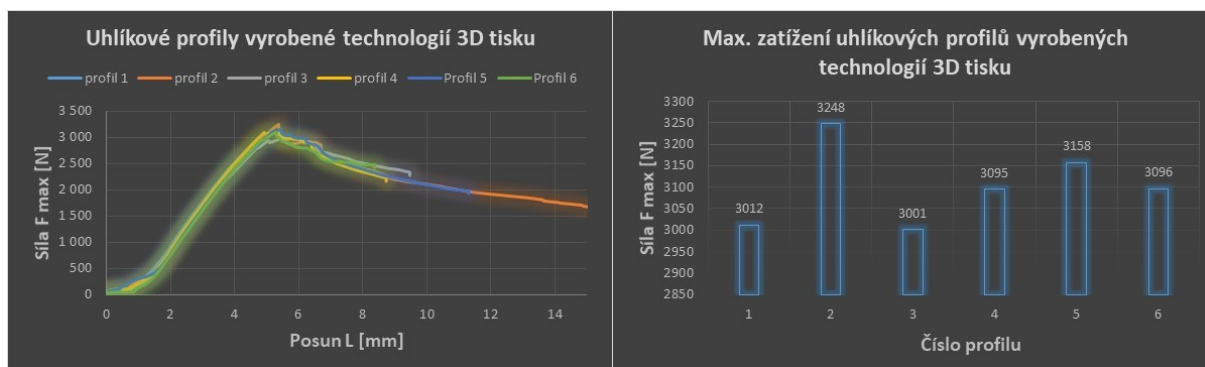


Hybridní profily vyrobené technologií PCM (obr. 84) jsou na tom obdobně jako předchozí případ uhlíkových profilů z prepregu. Opět křivky spolu téměř nekorespondují, každý profil dosahuje jiných hodnot zatížení i posunu. První profil nedosáhl ani 800 N, což vypadá spíše než na defekt struktury na špatné uchycení profilu v čelistech trhačního stroje. Profily č.2, č.3 a č.4. dosáhly dokonce hodnot přesahujících 3000 N. Zde je opět nejpravděpodobnějším důvodem vysokých hodnot přítomnost aramidových vláken v hybridní tkanině.



Obr. 84: Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr hybridních profilů vyrobených lisováním prepregu; spojnicový graf závislosti maximální síly na posunu vzorku (vlevo), sloupcový graf maximálních sil jednotlivých profilů (vpravo).

Posledním typem zkušebních prototypů odzkoušených na vzpěr byly profily vyrobené technologií 3D tisku (obr. 85). Z obou grafů je patrné, že jak průběh zkoušky, tak výsledné hodnoty maximálních sil jednotlivých kompozitních profilů jsou navzájem nejvyrovnanější. Profily byly na rozdíl od předchozích případů vyrobeny strojově, což zaručuje jejich přesnost a reprodukovatelnost se zaručením určitých hodnot. Maximální síla se u těchto vytisknutých profilů pohybovala v rozmezí 3000-3250 N při posunu přibližně 5 mm.



Obr. 85: Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených pomocí 3D tisku; spojnicový graf závislosti maximální síly na posunu vzorku (vlevo), sloupcový graf maximálních sil jednotlivých profilů (vpravo).

### 10.1.2 Statistické vyhodnocení zkoušky na vzpěr dutých kompozitních profilů

Kompozitní materiály vykazují větší rozptyl materiálových charakteristik, než tomu bývá u konvenčních materiálů. Proto je statistická analýza nezbytnou součástí jejich hodnocení. Dle použitých norem je minimální počet vzorků pro statistické hodnocení 5. Tato podmínka je v této práci splněna.

Každou sadu vzorků je potřeba statisticky vyhodnotit za použití následujících vztahů:

*Aritmetický průměr.* Je ukazatelem míry polohy. Používáme se v případech, kdy je možné hodnoty (čísla), které jsou kvantitativní, sčítat. Aritmetický průměr je definován jako podíl sumy výsledku k jeho počtu  $n$ .

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (10.1)$$

kde  $\bar{x}$ ...aritmetický průměr,  $n$ ... počet měření,  $x$ ... $i$ -tá hodnota měřené veličiny.

*Směrodatná odchylka.* Je charakteristikou variability, která popisuje kolísání dat kolem průměru a je definována jako odmocnina z rozptylu.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (10.2)$$

kde:  $s$ ...směrodatná odchylka,  $\bar{x}$ ...aritmetický průměr,  $n$ ...počet měření,  $x$ ... $i$ -tá hodnota měřené veličiny.

*Variační koeficient* – je mírou rozptýlení dat a je definován jako podíl směrodatné odchylky k aritmetickému průměru v procentech. Nejčastěji se využívá při statistické kontrole zkoušení materiálů.

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 [\%], \quad (10.3)$$

kde  $s$ ...směrodatná odchylka,  $\bar{x}$ ...aritmetický průměr [11].

V Tab. 18 je uvedeno srovnání výsledku experimentálního zkoušení všech materiálových variant kompozitních profilů na vzpěr s vyhodnocením maximální síly (kritické síly), při které je porušena stabilita vzorků. Tabulka je doplněna i o statistické charakteristiky (aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient).



Tab. 18: Porovnání výsledků maximální síly zatížení na vzpěr dutých kompozitních profilů.

n=6	$F_{\max}$ [N]				
Profily	Uhlík-ruč. laminace	Hybrid-ruč. laminace	Uhlík-PCM	Hybrid-PCM	Uhlík-3D tisk
<b>Profil 1</b>	2212	1468	2214	795*	3012
<b>Profil 2</b>	1719	2178	1096	3192	3248
<b>Profil 3</b>	2754	2103	1853	3157	3001
<b>Profil 4</b>	1448	1625	2607	1710	3095
<b>Profil 5</b>	1912	1823	2430	3361	3158
<b>Profil 6</b>	1854	1497	1978	1782	3096
<b>Aritmetický průměr</b>	<b>1983</b>	<b>1782</b>	<b>2030</b>	<b>2640</b>	<b>3102</b>
<b>Směrodatná odchylka</b>	453	305	536	821	93
<b>Variační koeficient [%]</b>	23	17	26	31	3

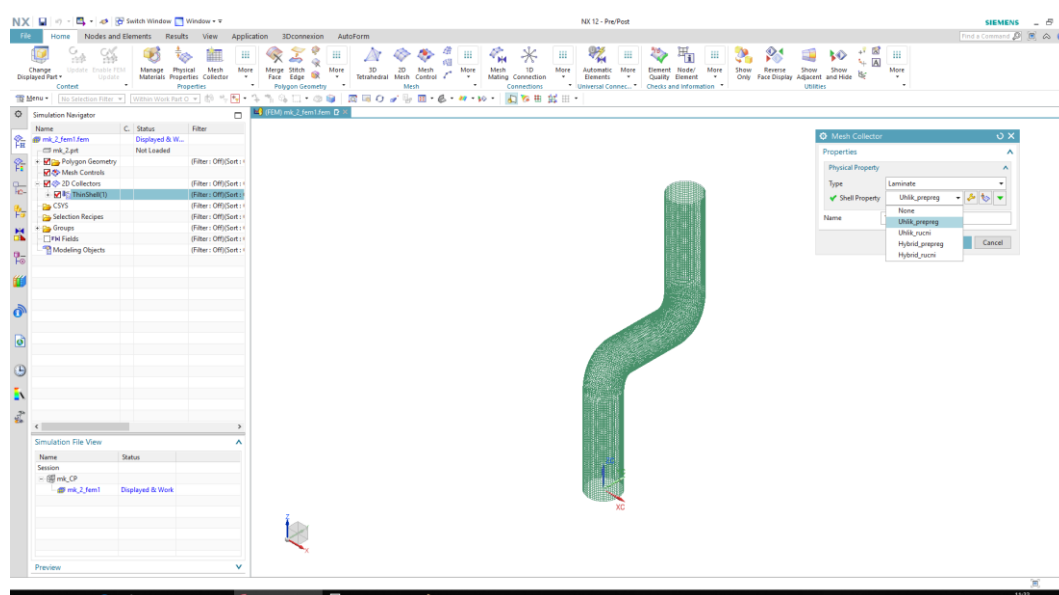
- Vyloučená hodnota ze statistického souboru; hrubá chyba.

Z výsledků maximální síly zatížení u jednotlivých typů profilů je patrné, že nejpřesněji byly vyrobené profily pomocí 3D tisku (3100 N). Tomu odpovídají i statistické charakteristiky. U profilu z hybridního prepregu vyšly statistické veličiny naopak nejvyšší, i přes vyloučenou hodnotu měření z celkového statistického souboru. Maximální síla u prvního profilu byla velmi nízká a byla způsobena zřejmě špatným upevněním vzorku v čelistech trhacího stroje nebo ovlivněním nástřihy a překlady předimpregnované tkaniny při nanášení kompozitního materiálu na jádro vzorku. Po vyloučení nejnižší hodnoty dosahovala maximální síla u profilů z hybridního prepregu celkem vysoké hodnoty, a to kolem 2600 N. Nejnižších hodnot maximální síly pak měly profily vyrobené ruční laminací, a to kolem 2000 N. To je dáno především nestejným prosycením tkaniny pryskyřičnou matricí nebo nedostatečným přitlačením tkanin při jejich vrstvení na jádro.

## 10.2 Analýza dutých kompozitních profilů pomocí MKP

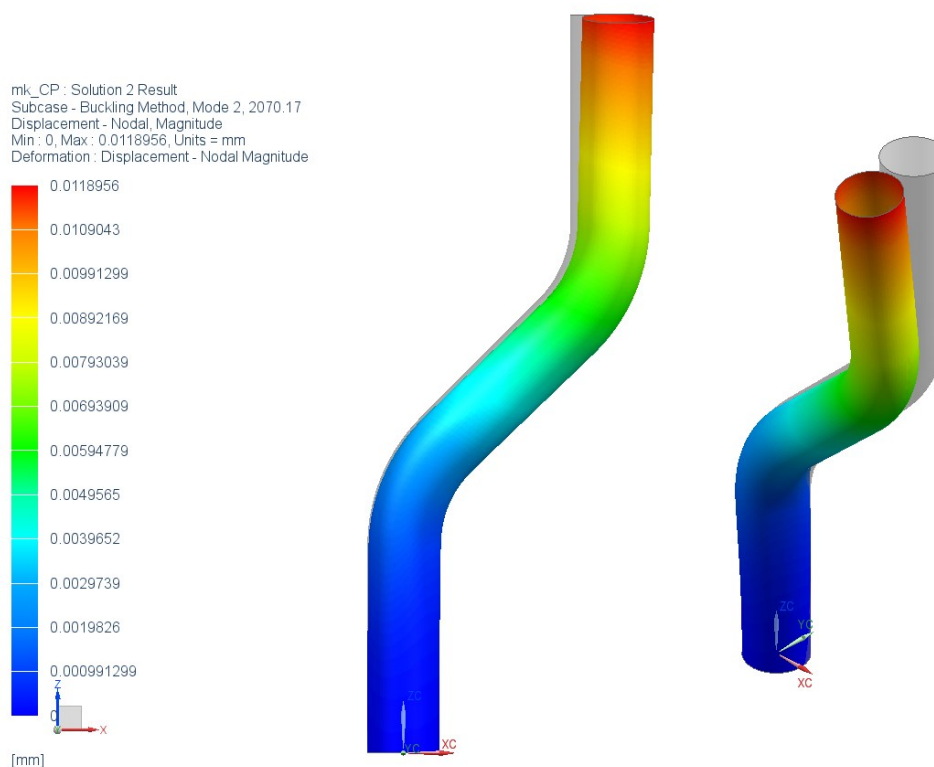
Druhým způsobem zjištění únosnosti vyrobených kompozitních profilů byla analýza pomocí MKP. Namodelování dutého profilu i samotná MKP analýza byla provedena v softwaru Siemens NX 12. NX je 2D a 3D CAD počítačový program od společnosti Siemens, který zjednodušuje a urychluje proces vývoje produktu. Zajišťuje všechna stadia vývoje výrobku od jeho návrhu až po výrobu. Tak jako většina podobných programů i NX umožňuje větší inovaci, vyšší kvalitu zpracování a snížení nákladů. Ověření návrhu a vizuální analýza výrobku lze snadno pomocí integrovaných nástrojů. Umožňuje tak kontrolovat správnost návrhu, zda se shoduje s požadavky na výrobek [104]. NX 12 je vhodný také pro modelování a analyzování vlákniny vyztužených plastů, což je velmi složitý proces. Struktura kompozitu bývá velmi složitá kvůli vrstvení jednotlivých vrstev vláknové výztuže na sebe. Díky širokému výběru nástrojů NX 12 je možné přesně nasimulovat laminát s tkaninovou výztuží a tento materiál analyzovat.

Pro vyhodnocení dutých kompozitních profilů z hlediska stability bylo nutné zjistit jejich kritickou sílu. Každý typ dutého kompozitního profilu byl nejdříve namodelován na základě počtu a tloušťky jednotlivých vrstev výztuže, tak aby byla dodržena tloušťka a profilu. Dále byly zadány pro každý typ profilu materiálové charakteristiky složek kompozitu, ze kterého byly profily vyrobeny. Pro každý druh vláknové výztuže a pryskyřice byly zadány hodnoty modulu pružnosti v tahu, mez pevnosti, poissonova konstanta nebo hustota. Pro vyhodnocení kritické síly se tedy nejdříve nastavil typ materiálu (obr. 86) a model se nechal analyzovat.



Obr. 86: Model profilu před analýzou pomocí MKP.

Na vzpěr bylo pro každý typ profilu vyhodnoceno 10 módů, což znamená, že každý mód obsahoval pravděpodobné vybočení vzorku (zhroucení struktury) v závislosti na velikosti kritické síly. Na obr. 87 je první analyzovaný dutý kompozitní profil (ve dvou pohledech), ručně laminovaný uhlíkový profil. Šedá část na obrázku znázorňuje původní postavení profilu. Barevné schéma pak představuje stav profilu po zatížení.

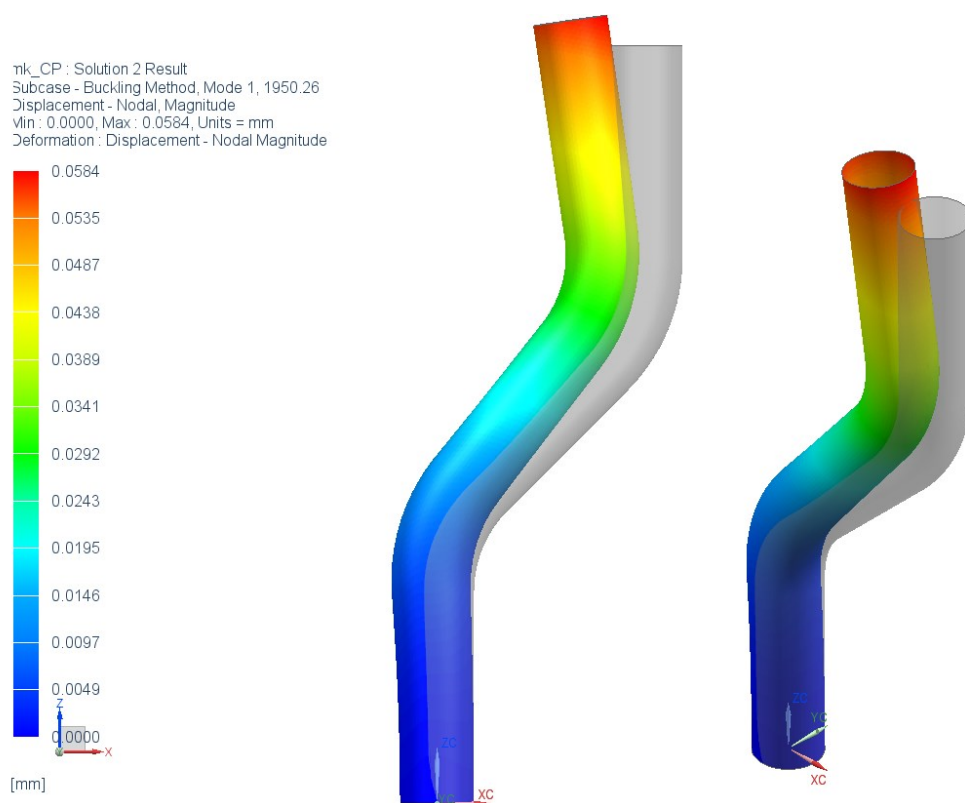


Obr. 87: Analýza MKP uhlíkového profilu vyrobeného ruční laminací.

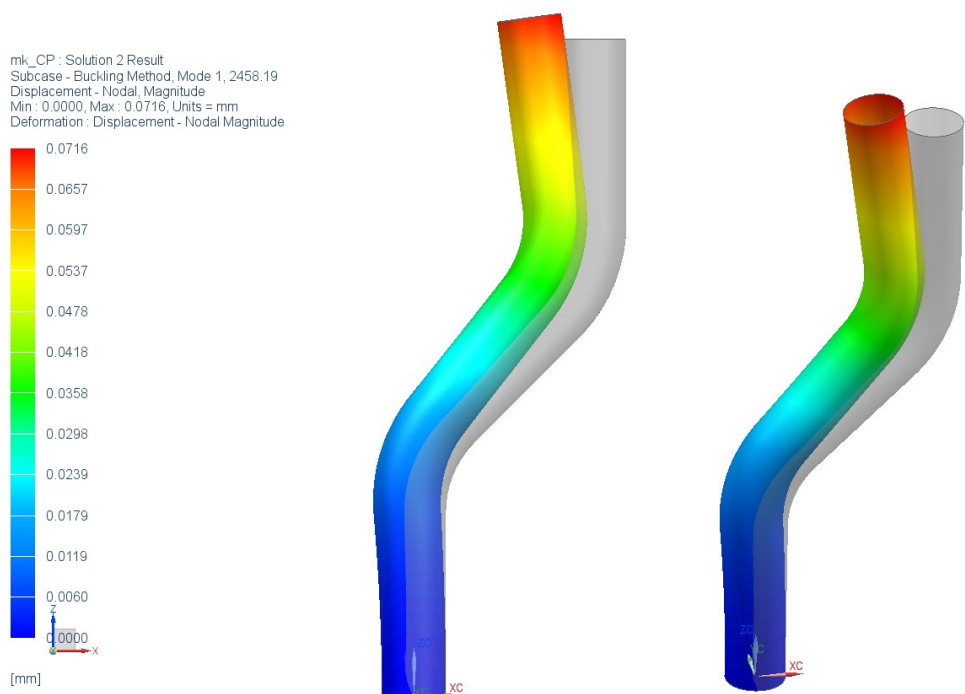
Kritická síla při zkoušce na vzpěr uhlíkového ručně laminovaného profilu dosáhla hodnoty 2070 N v nejpravděpodobnějším stavu ztráty stability.

Jako další byl analýze podroben další ručně laminovaný profil, tentokrát s hybridní výztuží. Na obr. 88 jsou opět viditelné dva pohledy vybočení profilu při dosažení kritické síly. V tomto dalším případě dosáhl profil kritické síly 1950 N v prvním módu ztráty stability.

Na obr. 89 je pak zdokumentován případ analyzovaného profilu z uhlíkového prepregu vyrobeného PCM. Hodnota kritické síly dosáhla 2458 N. Z výsledku tak vyplývá vyšší únosnost prepregového profilu než v případě výroby profilů ruční laminací.

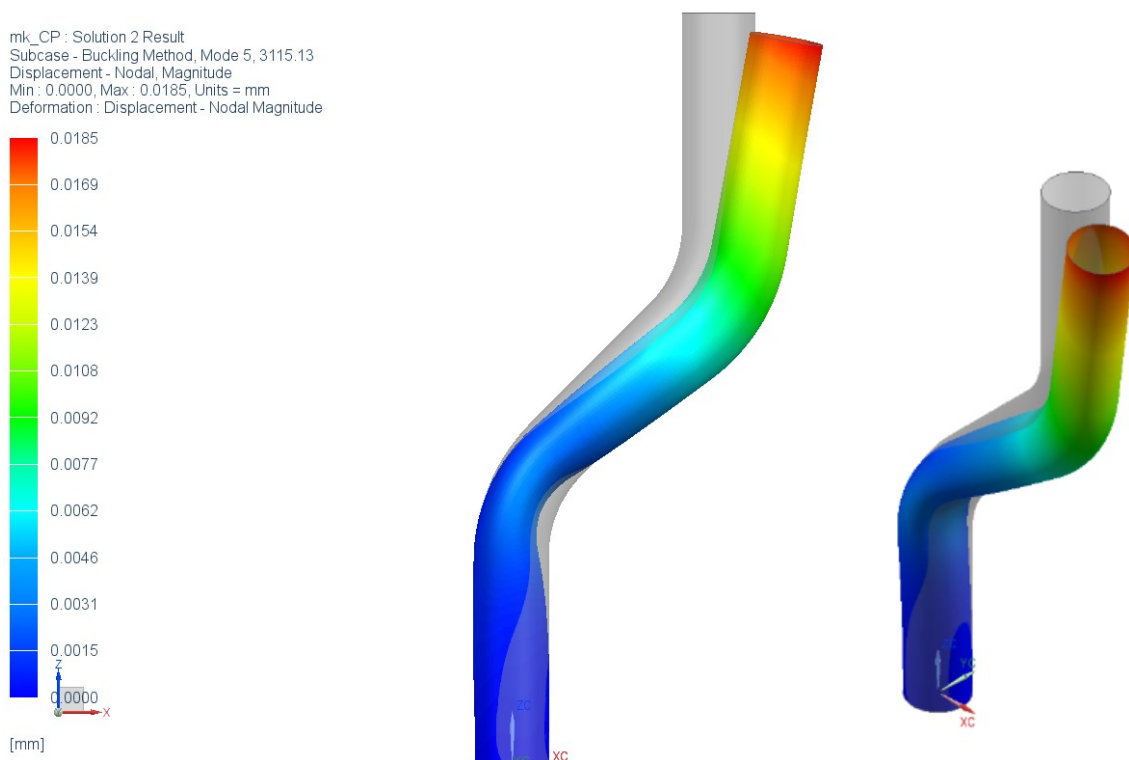


Obr. 88: Analýza MKP hybridního profilu vyrobeného ruční laminací.



Obr. 89: Analýza MKP uhlíkového profilu vyrobeného technologií PCM.

U profilů vyrobených lisováním hybridního prepregu vyšla podle analýzy MKP velikost kritické síly 2640 N v pátém módu pravděpodobného zborcení struktury, jak ukazuje obr. 90.



Obr. 90: Analýza MKP hybridního profilu vyrobeného technologií PCM.

U posledního typu vyrobených kompozitních profilů pomocí 3D tisku se analýza metodou konečných prvků neprováděla. Důvodem byla složitost modelování jednosměrně vyztužených kompozitů vyrobených 3D tiskem, kde se vlákna umisťují jiným způsobem, než je tomu u klasických technologií výroby jednosměrných kompozitů. Navíc díky přesné výrobě 3D tisku, kdy všechny profily jsou co do vlastností totožné, analýza MKP by neměla takový smysl jako u profilů ručně vyrobených. U profilů vyrobených 3D tiskem po zkoušce na vzpěr vznikly viditelné rýhy ve vnitřních ohybech zakřiveného těla profilu. Můžeme tedy předpokládat, že nejdříve došlo ke ztrátě pevnosti před ztrátou stability.

### 10.3 Srovnání experimentálních a simulovaných výsledků zkoušky na vzpěr

Vyhodnocení výsledků zkoušky na vzpěr provedených pro 4 typy ručně vyrobených dutých kompozitních profilů je pro přehlednost uvedeno v Tab. 19.

Tab. 19: Porovnání experimentálních výsledků a výsledků pomocí analýzy MKP na vzpěr; (RL – ruční laminace, PCM – lisování prepregů).

	$F_{krit}$ [N]			
Profily	Uhlík-RL	Hybrid-RL	Uhlík-PCM	Hybrid-PCM
Zkouška na vzpěr	1983	1782	2030	2640
Analýza MKP	2070	1950	2458	3115

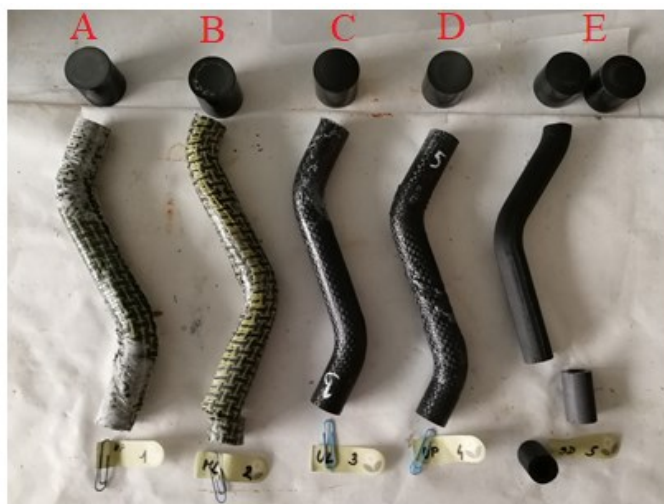
I když nebylo ze zkoušky na vzpěr jasné, jestli došlo nejdříve k porušení pevnosti nebo ztrátě stability, porovnáním hodnot je jasné, že i kdyby došlo první k porušení pevnosti, je splněna podmínka, že síla zatížení  $F_{max}$  je nižší než síla kritická  $F_{krit}$ . Pravděpodobnější je ale varianta, i vzhledem k tvaru profilů, že došlo první ke ztrátě stability, kdy se zborčila dosažením kritické síly struktura profilu. Tomu odpovídají i dosažené hodnoty  $F_{krit}$ , které jsou si v rámci stejného zkoumaného profilu velmi podobné. To potvrzuje i grafické vyhodnocení na obr. 91.



Obr. 91: Graf srovnání výsledků kritické síly vzpěru dutých kompozitních profilů.

## 11 ROZBOR MIKROSTRUKTURY KOMPOZITNÍCH PROTOTYPŮ

Pro mikrostrukturní analýzu byly použity vzorky odebrané z každého jednoho typu vyrobeného kompozitního profilu. Vzorek materiálu u ručně vyrobených kompozitů byl odebrán ve směru příčném, u 3D uhlíkových vzorků i z ohybu, z místa viditelné deformace po mechanickém zkoušení. Na obr. 92 lze vidět přípravu vzorků k mikrostrukturní analýze, které jsou vyfoceny fotoaparátem Canon EOS 5D s objektivem Canon Macro Lens EF 100 mm.



Obr. 92: Příprava vzorků pro rozbor mikrostruktury z: A) hybridního prepregu, B) hybridní tkaniny, C) uhlíkové tkaniny, D) uhlíkového prepregu, E) uhlíkových vláken a onyxu.

Vzorky byly připraveny jako metalografický výbrus. Nejdříve se příčné řezy vybraných profilů zalily do vodivé hmoty Poly Fast, což je černá bakelitová pryskyřice s uhlíkovým plnivem, pro zalisování za tepla. Tato pryskyřice je ideální, kdykoliv je žádoucí vysoká kvalita preparace, rovnoměrná velikost a tvar při krátkých dobách procesu. Dále se vzorky vybrousily na sadě brusných SiC papírů, vyleštily diamantovou pastou. Omyty vodou, odmaštěny lihem a vysušeny byly připraveny k mikroskopickému pozorování. Analýza mikrostruktury se provedla jak pomocí optického mikroskopu, tak pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

### 11.1 Mikrostruktura kompozitních profilů pomocí metalografické analýzy

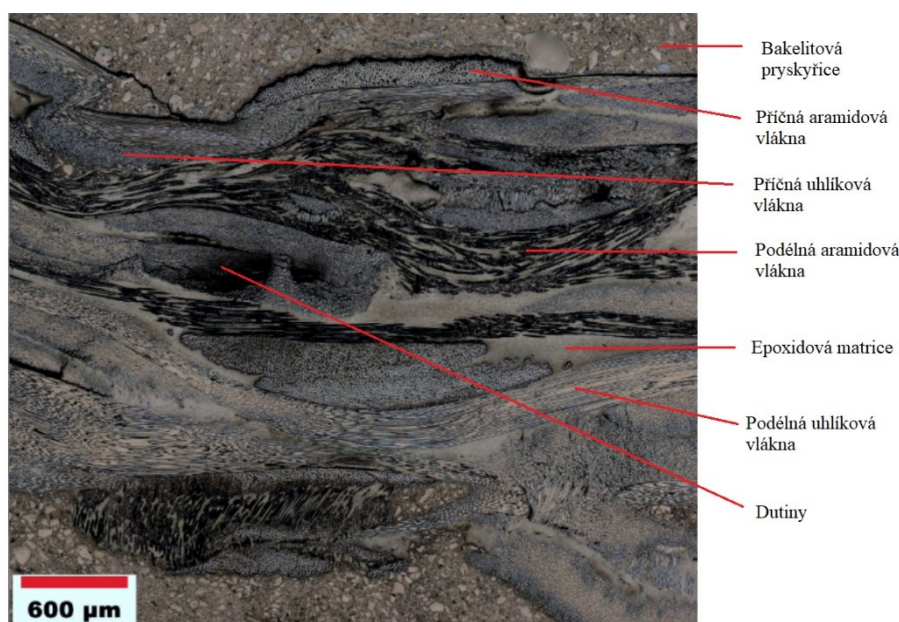
Snímky mikrostruktury pozorovaných materiálů byly vytvořeny pomocí optického mikroskopu Olympus GX51 se softwarem Image-Pro Premium 9.2 pro metalografickou analýzu.

Na snímcích mikrostruktury při rozlišení 600  $\mu\text{m}$  lze ve všech případech pozorovat uložení kompozitních vláken (uhlíková, aramidová) v příčném i podélném směru, obklopené maticí.



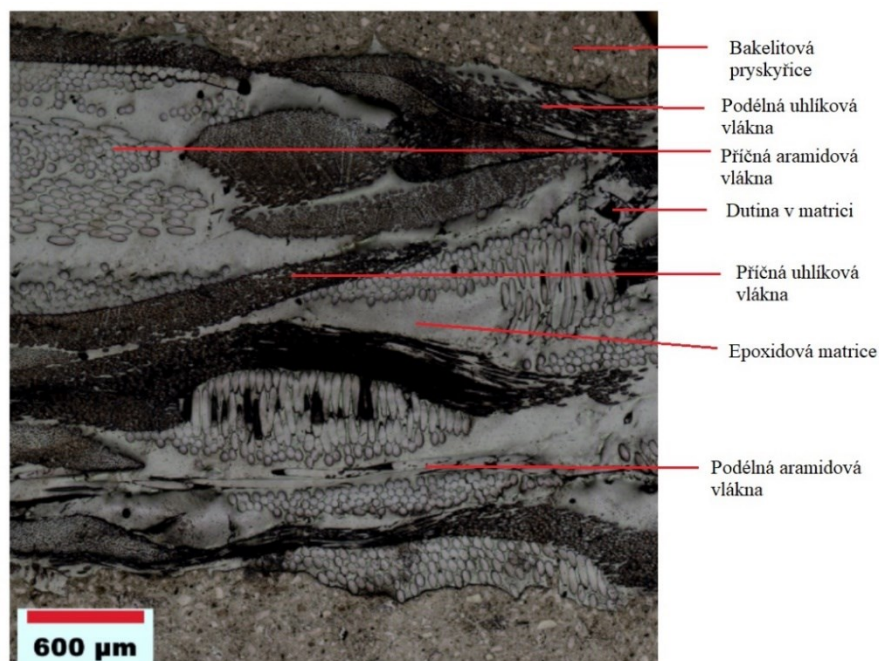
Tkaninová výztuž se viditelně vlní, což je dáno vrstvením materiálu kolem kruhového vnitřního jádra. Na snímcích lze rozeznat také řadu defektů, které vznikly při samotné výrobě vzorků. Vady mikrostruktury jako póry, dutiny, trhliny nebo poškozená vlákna a nedostatečné prosycení matricí ovlivňují mechanické vlastnosti kompozitních materiálů.

Na snímcích níže se objevuje mikrostruktura vzorků vyrobených z hybridního materiálu, kde se střídají uhlíková a aramidová vlákna, která vyztužují epoxidovou pryskyřici. Na obr. 93 je profil vyroben z prepregu, zatímco na obr. 94 se nachází struktura profilu vyrobeného ruční laminací. Snímky jsou si velmi podobné. Nepatrné rozdíly můžeme najít v lepším prosycení prepregové tkaniny pryskyřicí s menším počtem dutin a pórů, které jsou u ručně laminovaného kompozitu častější.



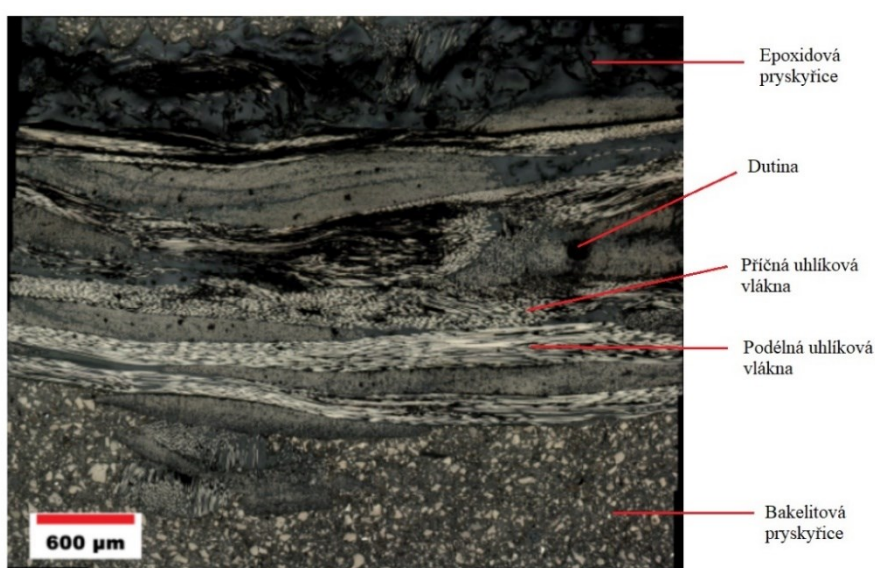
Obr. 93: Mikrostruktura profilu z hybridního prepregu-PCM.



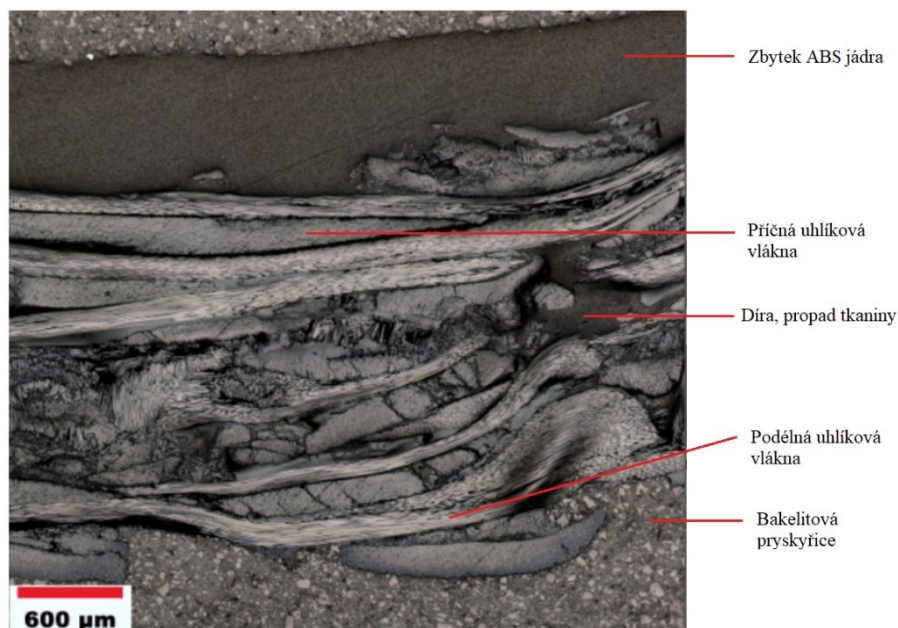


Obr. 94: Mikrostruktura profilu z hybridní tkaniny-ruční laminace.

Další dva snímky mikrostruktury byly vytvořeny z profilů vyrobených z uhlíkových vláken v epoxidové matrici, ruční laminací (obr. 95) a z uhlíkového prepregu (obr. 88). Mikrostruktura ručně sycené uhlíkové tkaniny působí více uspořádaně. Střídají se vrstvy příčných a podélných vláken. Minimum defektů značí správné položení vrstev tkaniny, které jsou rovnoměrně prosyceny matricí. Na obr. 96 mikrostruktura uhlíkového prepregu je naopak velmi neuspořádaná. Vrstvy se překrývají, nebo tkanina chybí úplně. Viditelné je i množství prasklin. Snímek mikrostruktury pravděpodobně odpovídá místu spoje prepregové tkaniny.

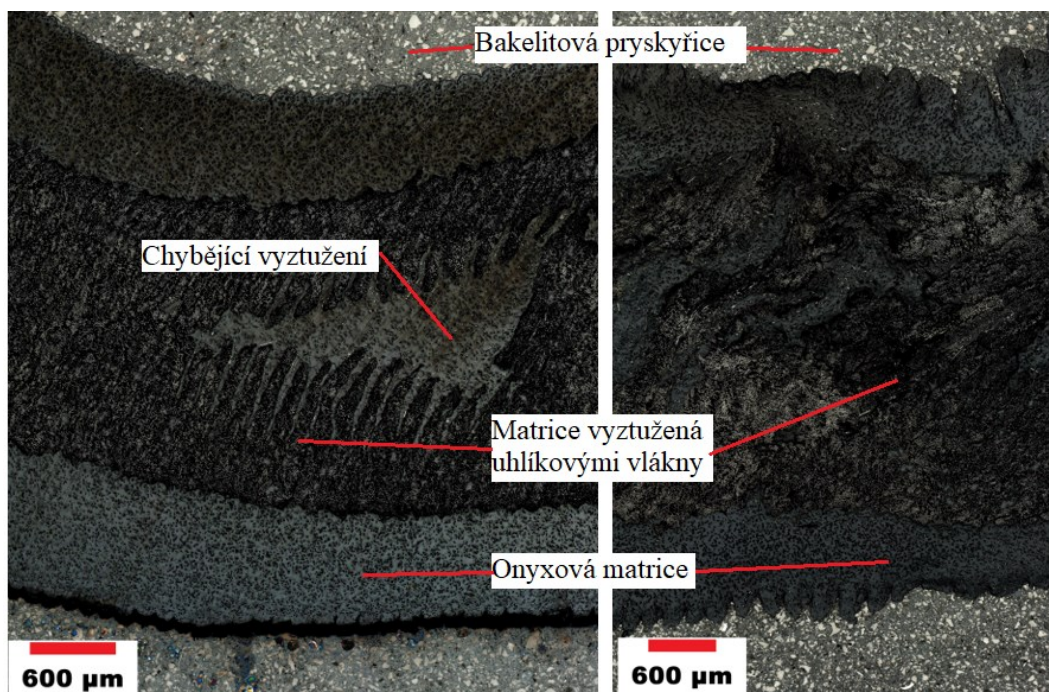


Obr. 95: Mikrostruktura profilu z uhlíkové tkaniny-ruční laminace.



Obr. 96: Mikrostruktura profilu z uhlíkového prepregu-PCM.

Poslední obr. 97 zachycuje mikrostrukturu uhlíkového profilu vyrobeného 3D tiskem. Příčný řez je tvořen pouze příčným řezem vláken, protože tento profil je vyztužený vlákny jednosměrně. Uhlíková vlákna jsou v tomto podélném směru velmi pevná, především v tahu, a jsou obaleny onyxovou matricí. Mikrostruktura výbrusu nalevo je vytvořena z rovné části profilu, tak jako ostatní vzorky. Uprostřed lze vidět defekt v podobě místa, které není vyztuženo vlákny. Napravo je pak snímek mikrostruktury vzorku odebraného z ohybu profilu, kde vznikla po zkoušce na vzpěr viditelná deformace. Porovnáním obou obrázků je zřejmé, že deformace způsobila jak zvlnění na okrajích vzorku, kde se nachází pouze vrstva onyxu bez vyztužujících vláken. Střední vrstva matrice s vlákny je pak zdeformovaná. Objevují se ostrůvky vláken a ostrůvky matrice bez vláken.



Obr. 89: Mikrostruktura profilu z uhlíkových vláken v onyxu-3D tisk.

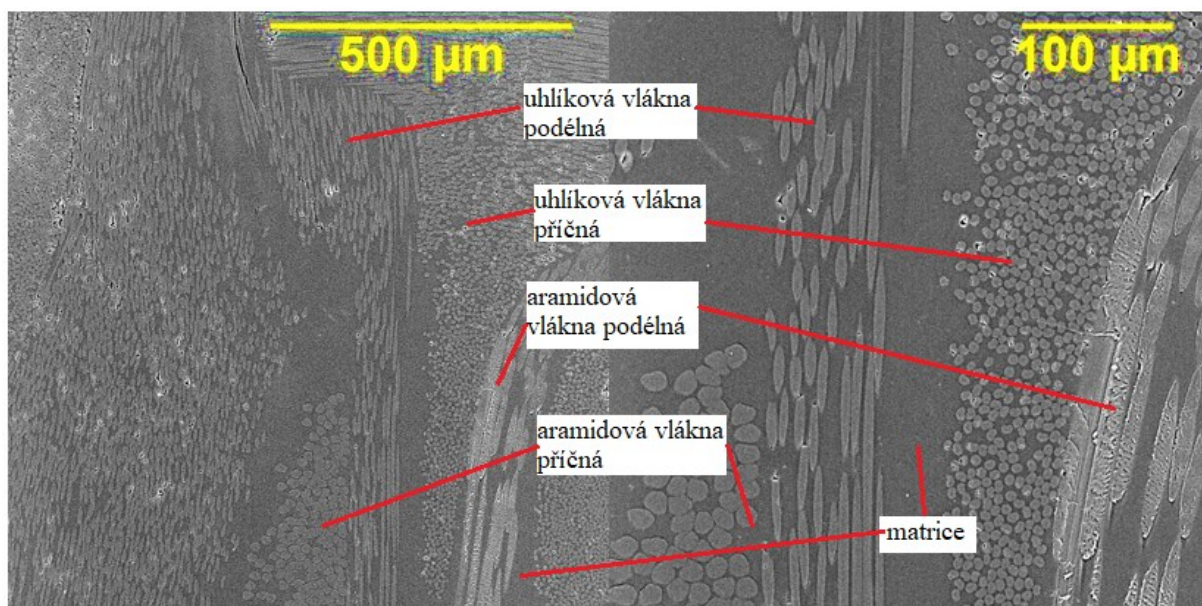
## 11.2 Mikrostruktura kompozitních profilů pomocí analýzy SEM

Pro pozorování pomocí SEM (sekundární elektronový mikroskop Explorer Termo Scientific s urychlovacím napětím 15 keV) musel být příčný povrch vzorků naprášen pomocí vodivého prášku Au-Pd.

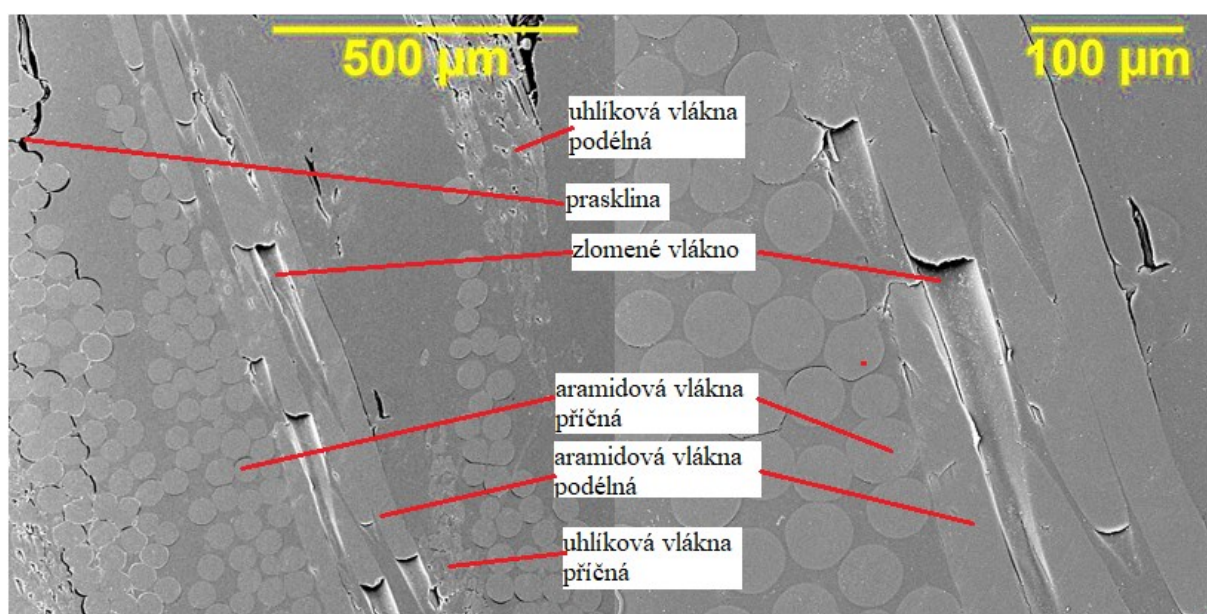
Na obr. 98 lze pozorovat mikrostrukturu profilu, vyrobeného z hybridního prepregu technologií PCM, při zvětšení 100 µm a 500 µm. Ve struktuře se nachází rozložení vláken uhlíkových i aramidových. Aramidová vlákna mají o poznání větší průměr, což je viditelné v podélném i příčném směru. Místo pozorování mikrostrukturu je bez viditelnějších strukturních vad.

Z hybridní tkaniny byl vyroben i další dutý kompozitní profil, a to technologií ruční laminace, jehož mikrostruktury si lze prohlédnout na obr. 99. Uhlíková vlákna nelze okem moc dobře rozlišit. Vyskytují se v místě pořízení snímku pouze v několika málo oblastech a nemají dobrý kontrast. Dominantní jsou tak vlákna aramidová, která jsou co do průměru oproti uhlíkovým vláknům až dvakrát větší. Na obr. 91 vpravo, při rozlišení 500 µm, jsou patrné defekty mikrostruktury jako prasklina, dutiny nebo zlomené konce vláken.



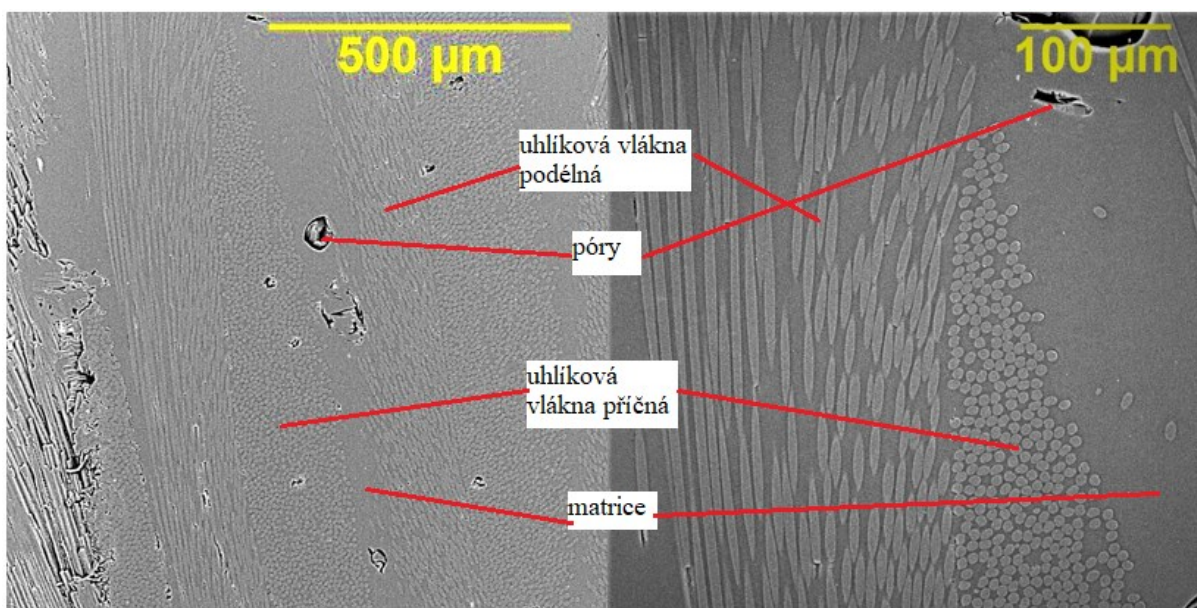


Obr. 98: Mikrostruktura profilu z hybridního prepregu-PCM.



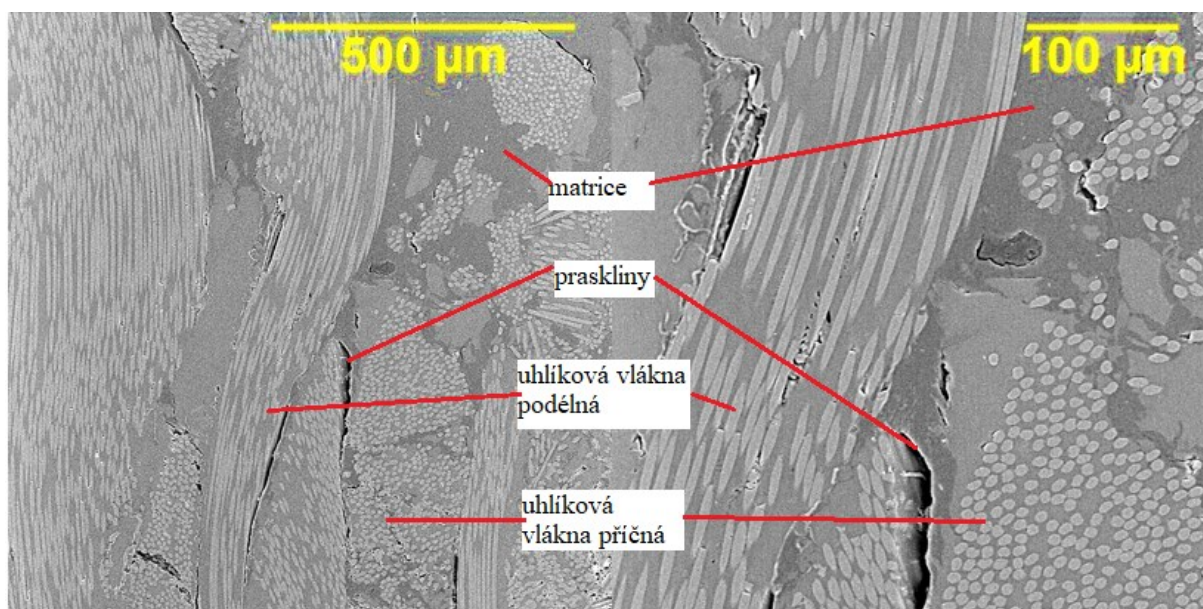
Obr. 99: Mikrostruktura profilu z hybridní tkaniny-ruční laminace.

Snímek mikrostruktury uhlíkového dutého profilu vyrobeného ruční laminací prezentuje obr. 100. Jsou zde patrné střídající se vrstvy příčného a podélného uložení uhlíkových vláken a až na pár pórů nejsou v mikrostruktuře žádné viditelnější defekty.



Obr. 100: Mikrostruktura profilu z uhlíkové tkaniny-ruční laminace.

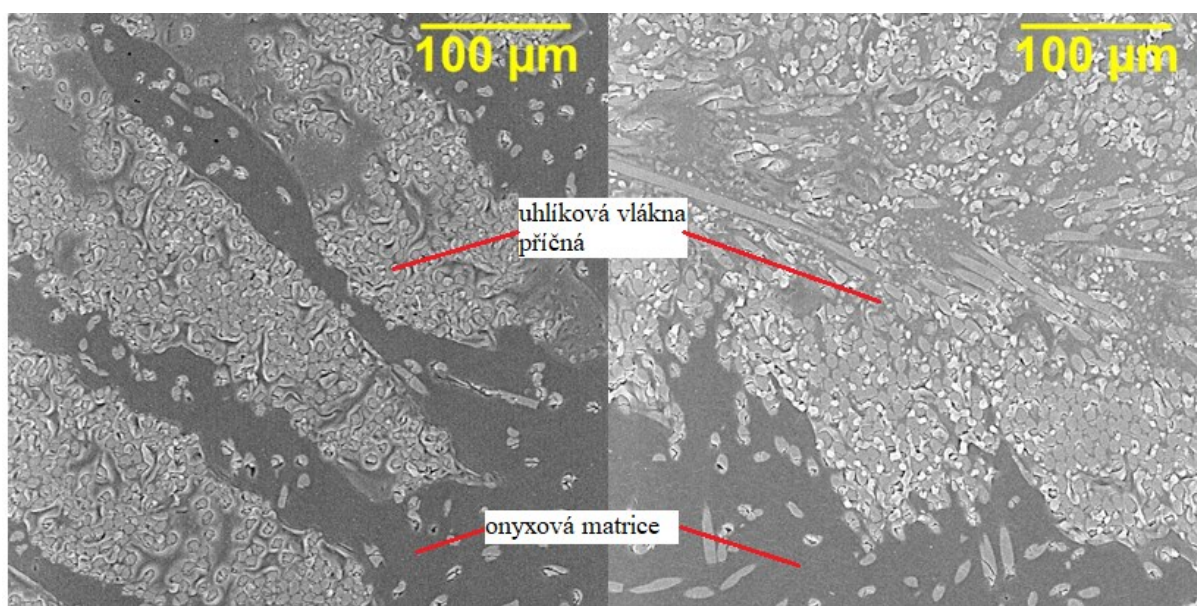
Další profil vyrobeným lisováním prepregů, konkrétně uhlíkového prepregu, je předmětem obr. 101. Mikrostruktura nemá na první pohled uspořádanou strukturu. Podélné a příčné uložení uhlíkových vláken tvoří spíše samostatné ostrůvky, které jsou obklopeny množstvím defektů. Místo pořízení mikrostruktury je nejspíš místo spoje vrstvy prepregu.



Obr. 101: Mikrostruktura profilu z uhlíkového prepregu-PCM.



Poslední snímek mikrostruktury (obr. 102) patří uhlíkovým profilům vyrobených 3D tiskem. Už na první pohled je možné vidět odlišnost struktury od předcházejících vzorků. V tomto případě jsou uhlíková vlákna tisknuta do matrice z onyxu. V mikrostruktuře se nachází pouze příčné uložení vláken, protože profily jsou vyztuženy pouze jednosměrně, a to po délce kompozitního dílu. Obr. 102 vlevo ukazuje mikrostrukturu vzorku odebraného z nedeformovaného profilu. Napravo se pak nachází mikrostruktura 3D tištěného profilu po deformaci. Zatím co nalevo vlákna tvoří výrazné ostrůvky kvůli nedostatečnému vyztužení matrice vlákny, což je patrné i ze SEM snímku na obr. 84, po deformaci (vpravo) se vlákna stlačila tlakem a nahromadila do jednoho místa.



Obr. 102: Mikrostruktura profilu z uhlíkových vláken v onyxu-3D tisk. Nedeformovaný vzorek (vlevo), deformovaný vzorek (vpravo).

---

## 12 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této práci bude řešena pouze cena za materiál potřebný k výrobě zkušebních vzorků a potřeb nutných k jejich vyrobení (forma, jádra), tzn. uhlíkový prepreg, hybridní prepreg, uhlíková a hybridní tkanina, epoxidová pryskyřice, necuron, ABS jádra a vzorky vyrobené pomocí 3D tisku. Ve skutečnosti ekonomické zhodnocení zahrnuje více faktorů, které s konečnými náklady souvisí. Jedná se o náklady na práci, spotřebovanou energii nebo např. odpisy. Náklady na pracovní sílu se liší podle místa kraje, kde výroba probíhá. Materiál tvoří až polovinu všech nákladů. V následujících podkapitolách jsou rozepsány položky na výrobu všech materiálových variant vyrobených prototypů.

### 12.1 Náklady za materiál na ručně vyrobené duté kompozitní profily

Před výrobou samotných kompozitních dutých profilů bylo nezbytné nejdříve vyrobit formu na lisování prepregových prototypů a vymyvatelná jádra, nutná k vytvoření dutiny kompozitních profilů. Do celkové ceny na výrobu prototypu byl zahrnut také aceton, který sloužil k vymývání ABS jader, aby vznikla dutina kompozitního profilu. Množství a cena výše zmíněných položek se vypočetly následujícím způsobem:

#### Cena dvoudílné formy z necuronu 651:

- cena materiálu – 4356 Kč / deska (1500x500x50 mm, tj. 0,0375 m<sup>3</sup>)
- objem materiálu na formu (275x200x70 mm) - 0,00385 m<sup>3</sup>
- cena formy celkem – **447 Kč**

#### Cena ABS jádra:

- Cena jader – 3720 Kč / 24 kusů jader
- Cena za 1 jádro – **155 Kč**

#### Cena acetonu:

- Spotřeba acetonu na 1 jádro – 5 litrů / 12 vzorků, tj. 0,42 litru / 1 prototyp
- Cena acetonu na 1 prototyp – 51 Kč (420 ml), tj. **51 Kč** za 1 prototyp

Rozpočet na výrobu prototypu z uhlíkového a hybridního prepregu je shrnuto v Tab. 20 a rozpočet ručně laminovaných vzorků v Tab.21. Do ceny za jeden kus prototypu byla zahrnuta cena prepregu, potřebného na pět vrstev materiálu pro každý vzorek. Dále se v ceně profilu promítla cena ABS vytištěného jádra a acetonu na následné vymytí jádra. Cena formy a jiné náklady jako odpisy do celkové ceny nejsou započteny. Pro představu je v tabulce uvedena také celková cena materiálu každé sady kompozitních profilů.

Tab. 20: Rozpočet na prototypy vyrobené metodou PCM.

	<b>Prototyp z uhlíkového prepregu (PCM)</b>	<b>Prototyp z hybridního prepregu (PCM)</b>
Plocha materiálu na 1 prototyp [m <sup>2</sup> ]	0,079	0,080
Cena prepregu za m <sup>2</sup> [Kč]	788	1135
Cena použitého prepregu na 1 prototyp [Kč]	62	91
Cena za 1 ABS jádro [Kč]	155	155
Cena acetonu na vymytí 1 kusu jádra [Kč]	51	51
<b>Cena za 1 prototyp celkem [Kč]</b>	<b>268</b>	<b>297</b>
Cena za prototypy celkem (6 ks) [Kč]	1608	1782

Cena použité epoxidové pryskyřice:

- Cena tvrdidla H 285 [Kč / kg] – 529 Kč
- Cena pryskyřice L 285 MGS [Kč / kg] – 689 Kč
- Cena pryskyřice a tvrdidla (váhový poměr 100 : 40, tj. 14,3 : 5,7) na 1 vzorek uhlíkového prototypu [Kč] - 10 Kč pryskyřice, 3 Kč tvrdidlo, celkem **13 Kč**



- Cena pryskyřice a tvrdidla (váhový poměr 100 : 40, tj. 17,1 : 6,9) na 1 vzorek uhlíkového prototypu [Kč] - 12 Kč pryskyřice, 4 Kč tvrdidlo, celkem **16 Kč**

Tab. 21: Rozpočet na prototypy vyrobené metodou ruční laminace.

	<b>Prototyp z uhlíkové tkaniny (RL)</b>	<b>Prototyp z hybridní tkaniny (RL)</b>
Plocha materiálu na 1 prototyp [m <sup>2</sup> ]	0,078	0,079
Cena tkaniny za m <sup>2</sup> [Kč]	378	500
Cena použité tkaniny na 1 prototyp [Kč]	30	40
Cena pryskyřice na 1 prototyp [Kč]	13	16
Cena za 1 ABS jádro [Kč]	155	155
Cena acetonu na vymytí 1 kusu jádra [Kč]	51	51
<b>Cena za 1 prototyp celkem [Kč]</b>	<b>249</b>	<b>262</b>
Cena za prototypy celkem (6 ks) [Kč]	1494	1572

## 12.2 Náklady za materiál na duté kompozitní profily vyrobené 3D tiskem

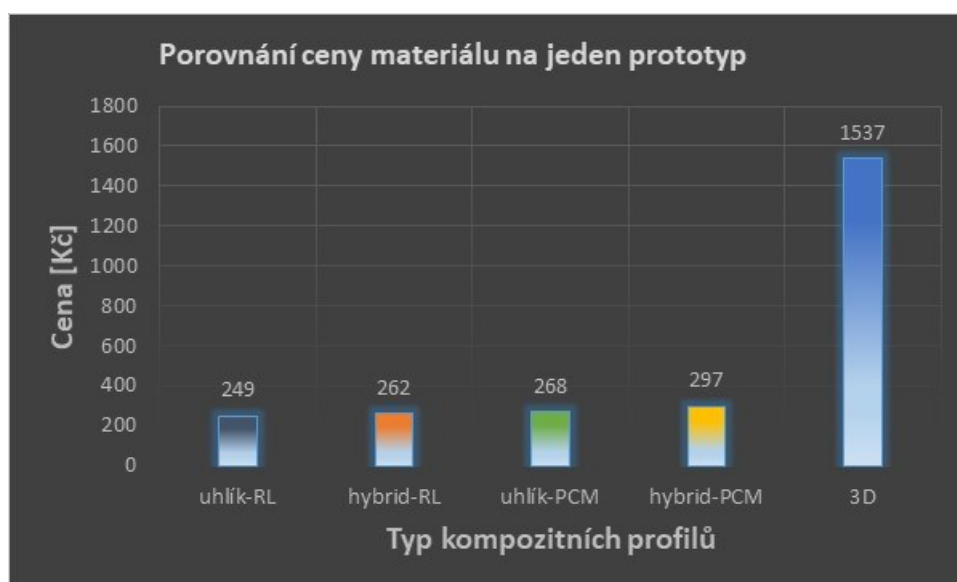
Kompozitní prototypy byly vyrobeny kompletně pomocí 3D tiskárny. Cena vzorků (Tab. 22) byla udána v USD měně (67.45 USD za 1 kus výtisku). Kurz se pohybuje cca 22,78 Kč za 1 USD.

Tab. 22: Rozpočet na prototypy vyrobené metodou 3D tisku.

	<b>Cena za 1 prototyp [Kč]</b>	Cena za prototypy celkem [Kč]
<b>Uhlíkový prototyp – 3D tisk</b>	<b>1537</b>	<b>9219</b>

### 12.3 Srovnání nákladů na vyrobený prototyp

Pro lepší přehlednost byly výdaje za materiál potřebný k výrobě jednoho prototypu konkrétní technologií porovnány graficky. Toto porovnání lze najít na obr. 103. Do ceny profilů z prepregu nebyla započítána cena za formu.



Obr. 103: Graf porovnání ceny materiálu pro 1 prototyp vyrobený konkrétní technologií; (RL-ruční laminace, PCM-lisování prepregů, 3D-3D tisk).

Z grafu je patrné, že náklady na výrobu ručně vytvořených dutých kompozitních profilů jsou oproti strojové výrobě pomocí 3D tisku 5-krát až 6-krát nižší. U ruční výroby se cena za jeden kus prototypu pohyboval zhruba mezi 250 a 300 Kč. Nejúsporněji se vyrobil prototyp z uhlíkových vláken technologií ruční laminace. Nejdražší z této kategorie pak byl prototyp z hybridního prepregu. Cena vytisknutého profilu je velmi vysoká, ale na rozdíl od ručně vyrobených vzorků, je u 3D tisku garantovaná přesnost a replikovatelnost kompozitních dílů se stále stejnými mechanickými vlastnostmi.

---

## 13 PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Hlavní přínos práce spočívá v rozšíření poznatků o chování kompozitních nesouosých profilů z uhlíkových a hybridních vláken a kompatibilních epoxidových pryskyřic. Předložená dizertační práce řeší problematiku dutých nesouosých kompozitních profilů a jejich metodiku výroby, včetně rámcového postupu výroby pro obě zvolené zpracovatelské technologie. Řešila se zde otázka srovnání technologických postupů výroby dílů, jejich mechanických vlastností i ekonomického hlediska výroby, tj. jaký vliv má na únosnost, hmotnost a cenu profilů jeho navržené materiálové složení. Práce byla rozšířena také o poznatky 3D tisku vláknových kompozitních materiálů. Navržená forma, vyrobená v rámci této dizertační práce, může v budoucnu na pracovišti sloužit k přípravě různých typů kompozitních prototypů, které se mohou stát předmětem dalšího výzkumu. Dizertační práce obsahuje řadu teoreticky i experimentálně popsanych informací z oblasti kompozitních materiálů, zejména definováním požadavků při zavádění kompozitních materiálu pro mechanické aplikace, a proto může být použita jako studijní materiál pro studenty bakalářského a magisterského studia.

Přínosy pro praxi jsou právě v popisu chování se uhlíkových a hybridních prototypů navržených v této dizertační práci. V mnoha aplikacích se vzhledem na nízkosériovou výrobu nevyplatí investovat do drahých zařízení jako jsou např. pultruzní linky nebo navíjecí stroje, a proto výsledky experimentálně získané a ověřené pomocí MKP jsou cenným zdrojem informací. Uplatnění vláknové kompozity nachází v automobilovém, leteckém nebo stavebním průmyslu. Jejich použití se také čím dál více rozšiřuje v medicínských oborech. Nebo jsou vhodné pro svou zajímavou strukturu jako designové prvky, např. v architektuře.

Z MKP modelování vytvořené analýzy mohou být využity pro přibližnou predikci kritické síly, zejména pro vzpěr nesouosých profilů s ohledem na vlastnosti použitých vláken a pryskyřice. Dosažené výsledky z mikrostruktury poskytují informace společností, které zavádějí kompozitní materiály do svého výrobního programu jako jeden z nástrojů hodnocení kvality finálních kompozitních dílů, zejména pórovitosti, nedostatečného prosycení vláken, zvlnění. Souvislost výskytu takových vad při jednotlivých zpracovatelských technologiích umožní nastavit výrobní proces tak, aby se jejich výskyt eliminoval v co největší míře.

Na výsledky získané v této práci lze navázat dalšími experimenty, např. únavovými zkouškami a vyřešit tak otázku životnosti. Nebo najít obecný vztah pro vzpěr dutých nesouosých kompozitních profilů různých délek, zakřivení i tloušťek stěny.

---

## 14 ZÁVĚR

Předložená dizertační práce se zabývá návrhem a modelováním kompozitních struktur, které nacházejí stále výraznější uplatnění zejména v medicínských aplikacích. Cílem je inovovat vybranou část kompenzační pomůcky - čtyřbodové hole. Pro rozsah práce byla pro inovaci vybrána pouze nejkritičtější část lokomoční pomůcky, a to zakřivená část těla konstrukce tvaru tzv. „labutí šíje“, nacházející se těsně pod rukojetí hole. Zakřivená část přenáší lépe zatížení pacienta do podstavy této hojně využívané pomůcky, zejména v rehabilitačních centrech pacienty s pohybovým deficitem a spasticitou. Inovace by měla splnit požadavky dosud duralové konstrukce na odlehčení pomůcky, zvýšení její stability, únosnosti a designu.

Lze říci, že konstrukce tvaru „labutí šíje“ je technicky dutý nesouosý profil. Nejdříve bylo potřeba navrhnout výrobní technologii, což byla výzva, vzhledem k absenci jakékoliv literatury s tématem výroby dutých zakřivených profilů vyrobených z kompozitů. Z pohledu výroby se jedná o složitou aplikaci těchto materiálů, a proto celý proces návrhu a výroby vyžaduje komplexní přístup vzhledem na komplikace. Kompozity se totiž chovají jinak, než tradiční materiály a spolu s výrobou materiálu se musí uvažovat už s tvarem budoucího výrobku. Jako nejrychlejší a nízkorozpočtové technologie, které jsou dostačující na výrobu zkušebních prototypů, byly navrženy technologie ruční laminací a lisováním prepregů ve formě (PCM). Tyto dvě ruční metody výroby byly doplněny pro srovnání o stále používanější technologií přesnější strojové výroby, 3D tisk. Navržením konstrukce těla z kompozitu se tak splní požadavek na odlehčení a design konstrukce. Konkrétně byly na výrobu zkušebních prototypů vybrány dva materiálové typy kompozitů, uhlíkový a hybridní uhlík/aramidový syceny kompatibilní epoxidovou pryskyřicí. Zvolené materiály spadají do oblasti běžně používaných materiálů, takže lze u nich předpokládat určité vlastnosti a chování při konkrétních podmínkách. 3D tiskem byly vyrobeny prototypy jednosměrně vyztužené uhlíkovými vlákny spojeny onyxovou maticí. Na vytvoření dutiny v zahnutém profilu se nejlépe osvědčila metoda výroby vymyvatelných jader, na které se nanese kompozitní materiál, který na jádrech vytvrdí, jádra se poté odstraní, a tím vznikne dutina. Jádra byla vyrobena z polymeru ABS pomocí 3D tisku.

Bylo tedy celkem vyrobeno pět typů zkušebních prototypů, a to z uhlíkové a hybridní tkaniny metodou ruční laminace, z uhlíkového a hybridního prepregu metodou PCM a poslední prototypy byly vyrobeny 3D tiskem. Jelikož profily mají být v budoucí aplikaci zatěžovány

pouze na vzpěr, byly také na vzpěr mechanicky odzkoušeny. Výsledky experimentu byly dále ověřeny pomocí analýzy metodou konečných prvků (MKP) za použití softwaru Siemens NX12.

Experimentální zkouška na vzpěr byla zvolena pro kontrolu stability prototypu. Při realizaci experimentálního zkoušení bylo nejdůležitější určit, jestli došlo k porušení pevnosti, anebo ztrátě stability, což nebylo úplně jednoznačné. Proto maximální sílu porušení při mechanické zkoušce můžeme pokládat za kritickou sílu porušení stability, zborcení struktury. Tento předpoklad potvrdily i výsledky analýzy získané pomocí MKP, kdy výsledky s těmi experimentálními téměř korelují. V práci byl vyhodnocen také čas výroby jednotlivých typů profilů a také ekonomická stránka výroby. Kritická síla u prototypů vyrobených ruční laminací (6 vzorků / 40 hodin) se pohybovala kolem 2000 N. U prototypů vytvořených metodou PCM (6 vzorků / 43 hodin) kritická síla dosáhla velikosti až 2600 N. U ručně laminovaných profilů byl ale průběh zatěžování stabilnější než u vzorků vyrobených z prepregů, kde hrály roli průstřihy jednotlivých vrstev prepregu. Nejvyšších hodnot dosáhl profil vyrobený 3D tiskem, přes 3000 N, kde ale také čas výroby byl nejdelší a to 63 hodin na sadu vzorků (6 kusů). Cenově se ručně vyrobené zkušební prototypy pohybovaly mezi 250 a 300 Kč za jeden prototyp, u 3D tisku se cena vyšplhala téměř na šestinásobek 1500 Kč.

Při srovnání s duralovou verzí hole, je i váha vyrobených profilů nižší. Oproti duralové konstrukci, vážící 100 g, profil z uhlíkové tkaniny měl po výrobě hmotnost 23 g, z hybridní tkaniny 30 g, z uhlíkového prepregu 27 g a z hybridního prepregu 37 g.

Obecně lze na základě získaných výsledků konstatovat, že dizertace splnila zadané cíle.

.

---

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1:</b>	Srovnání vlastností vyztužujících vláken. ....	16
<b>Tab. 2:</b>	Přehled a srovnání vlastností aramidových, uhlíkových a skelných vláken.....	20
<b>Tab. 3:</b>	Vlastnosti různých druhů matric.....	25
<b>Tab. 4:</b>	Parametry duralové čtyřbodové hole. ....	60
<b>Tab. 5:</b>	Rozměry navrženého kompozitního prototypu. ....	65
<b>Tab. 6:</b>	Vlastnosti tiskových filamentů ABS a HIPS.....	66
<b>Tab. 7:</b>	Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Dimension SST 768.....	68
<b>Tab. 8:</b>	Parametry CNC centra HAAS VF-2YT .....	72
<b>Tab. 9:</b>	Vlastnosti výztuže prepregu. ....	74
<b>Tab. 10:</b>	Rozměry jednotlivých vrstev obou druhů prepregů.. ....	76
<b>Tab. 11:</b>	Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ metodou lisování prepregů (PCM).. ....	76
<b>Tab. 12:</b>	Parametry uhlíkové a hybridní tkaniny pro výrobu profilů ruční laminací.....	79
<b>Tab. 13:</b>	Specifické a mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice L 285 .....	80
<b>Tab. 14:</b>	Specifikace nejpoužívanějších tužidel.....	80
<b>Tab. 15:</b>	Množství materiálu (tkaniny, pryskyřice) na výrobu 1 vzorku .....	82
<b>Tab. 16:</b>	Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ metodou ruční laminace.....	82
<b>Tab. 17:</b>	Rámcový technologický postup výroby prototypu tvaru „labutí šíje“ 3D tiskem.	86
<b>Tab. 18:</b>	Porovnání výsledků maximální síly zatížení na vzpěr dutých kompozitních profilů. ....	97
<b>Tab. 19:</b>	Porovnání experimentálních výsledků a výsledků pomocí analýzy MKP na vzpěr; (RL - ruční laminace, PCM – lisování prepregů).. ....	102
<b>Tab. 20:</b>	Rozpočet na prototypy vyrobené metodou PCM.....	112
<b>Tab. 21:</b>	Rozpočet na prototypy vyrobené metodou ruční laminace .....	113
<b>Tab. 22:</b>	Rozpočet na prototypy vyrobené metodou 3D tisku .....	113

---

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1:</b>	Skladba kompozitního materiálu s vláknovou výztuží .....	10
<b>Obr. 2:</b>	Schematické rozdělení vláknových kompozitů .....	11
<b>Obr. 3:</b>	Schématické zobrazení mezifáze kompozitu.....	12
<b>Obr. 4:</b>	Možnosti orientace vláken v kompozitních materiálech .....	13
<b>Obr. 5:</b>	Polární diagram pevnosti v tahu pro laminát (L-podélný/osový směr, Q-kolmý směr).. .....	13
<b>Obr. 6:</b>	Srovnání vlastností tradičních a kompozitních materiálů.....	14
<b>Obr. 7:</b>	Srovnání mechanických vlastností jednotlivých složek kompozitu s kompozitem samotným.....	15
<b>Obr. 8:</b>	Srovnání vlastností jednosměrně a tkaninou vyztuženého kompozitu s uhlíkovými vlákny .....	16
<b>Obr. 9:</b>	Uhlíková tkanina a výsledný uhlíkový kompozit .....	17
<b>Obr. 10:</b>	Mikrostruktura podélných aramidových vláken po deformaci.....	18
<b>Obr. 11:</b>	Tkanina ze skleněných vláken .....	18
<b>Obr. 12:</b>	Hybridní výztuž s plátňovou vazbou (vlevo) a keprovou vazbou (vpravo). .....	19
<b>Obr. 13:</b>	Jednotlivé typy hybridizace .....	20
<b>Obr. 14:</b>	Princip hybridního účinku. ....	21
<b>Obr. 15:</b>	Příklady formy vláken .....	21
<b>Obr. 16:</b>	Vazby tkanin; a) vazba plátňová, b) vazba keprová, c) vazba saténová.....	22
<b>Obr. 17:</b>	Proces výroby prepregu. ....	23
<b>Obr. 18:</b>	Znázornění povrchové energie a kontaktního úhlu $\theta$ u kapky matrice na tuhém povrchu dobré smáčení (vlevo), špatné smáčení (vpravo) .....	24
<b>Obr. 19:</b>	Využití kompozitních materiálů v medicíně.....	26
<b>Obr. 20:</b>	Konstrukce externí (vlevo) a vnitřní (vpravo) fixátoru .....	28
<b>Obr. 21:</b>	Hole (vlevo); a) jednobodová s deštníkovým madlem, b) s madlem tvaru labutí šíje c) čtyřbodová. Berle (vpravo); a) podpažní, b) francouzská, c) kanadská.....	30
<b>Obr. 22:</b>	Chodítko čtyřkolové (vlevo), standartní mechanický vozík (vpravo). .....	30
<b>Obr. 23:</b>	Myoelektrická protéza (vlevo), typy dolních proték (vpravo). .....	31
<b>Obr. 24:</b>	Srovnání pohlcení energie SAE pro různé materiály .....	33
<b>Obr. 25:</b>	Vývojový diagram návrhu kompozitní struktury. ....	34
<b>Obr. 26:</b>	Modelování fází kompozitu a FE analýza .....	39

<b>Obr. 27:</b>	RVE (a) Epoxidu na bázi Ag, (b) BaTiO <sub>3</sub> , (c) Epoxidu na bázi Fe, (d) kompozit BaTiO <sub>3</sub> -Ag-EA-BaTiO <sub>3</sub> a (e) and BaTiO <sub>3</sub> -Fe-EA-BaTiO <sub>3</sub> .....	40
<b>Obr. 28:</b>	Model tkaniny plátno (vlevo) a kepr (vpravo).....	40
<b>Obr. 29:</b>	Graf závislosti napětí na deformaci – plátňová vazba.....	41
<b>Obr. 30:</b>	Simulované prodloužení vzorku s ideální strukturou – plátňová vazba.....	42
<b>Obr. 31:</b>	Graf závislosti napětí na deformaci kompozitu s bublinami – plátňová vazba. ....	42
<b>Obr. 32:</b>	Srovnání reálných a teoretických vlastností zkoumaných kompozitů.....	43
<b>Obr. 33:</b>	Simulace FE zhutnění čtyř vrstev textilie s hladkou vazbou; a) před zhutněním a b) po zhutnění FE ( $\varepsilon_{33}$ - zhutnění). ....	44
<b>Obr. 34:</b>	Geometrický model plátňové tkaniny: a) jednotková buňka plátňové tkaniny, b) průřez optickým svazkem.....	45
<b>Obr. 35:</b>	a) Zvlněný karbonový vzorek, b) Simulace axiálního stlačení vlnitého vzorku. ..	46
<b>Obr. 36:</b>	Schéma vykreslení CAD modelu do formátu STL.....	46
<b>Obr. 37:</b>	Princip 3D tisku technologií FDM .....	47
<b>Obr. 38:</b>	Detail 3D tisku vrstva po vrstvě FDM technologií.....	48
<b>Obr. 39:</b>	Aditivní výroba bionického ucha; CAD-kresba bionického ucha (A), použité materiály k vytvoření bionického ucha 3D tiskem (B), ilustrace 3D vytištěného bionického ucha (C).....	50
<b>Obr. 40:</b>	Modifikace modelu oka (vlevo) a hotová protéza oka pomocí 3D tisku.....	51
<b>Obr. 41:</b>	Mandibulární implantát vyrobený 3D tiskem. ....	51
<b>Obr. 42:</b>	Designová ortéza vyrobená aditivní technologií .....	52
<b>Obr. 43:</b>	Princip pultruze (vlevo) a profily vyrobené touto technologií (vpravo).....	53
<b>Obr. 44:</b>	Princip technologie navíjení. ....	54
<b>Obr. 45:</b>	Princip technologie PCM (vlevo) a dutý profily vyrobené touto technologií (vpravo).....	55
<b>Obr. 46:</b>	Výroba dutých kompozitů ruční laminací .....	56
<b>Obr. 47:</b>	Duralová čtyřbodová podpůrná hole .....	60
<b>Obr. 48:</b>	Technické schéma ortopedické vycházkové hole; složená hole (vlevo), rozložená hole s funkcí sedátka (vpravo). ....	62
<b>Obr. 49:</b>	Technické schéma ortopedické vycházkové hole s možností rozložení.....	62
<b>Obr. 50:</b>	Technické schéma ortopedické vycházkové hole s možností rozložení.....	63
<b>Obr. 51:</b>	Užitný model francouzská předloketní berle z kompozitního materiálu.....	64
<b>Obr. 52:</b>	Vybraný segment hole pro materiálovou inovaci.....	65
<b>Obr. 53:</b>	Návrh průřezu jádra dutého profilu. ....	66

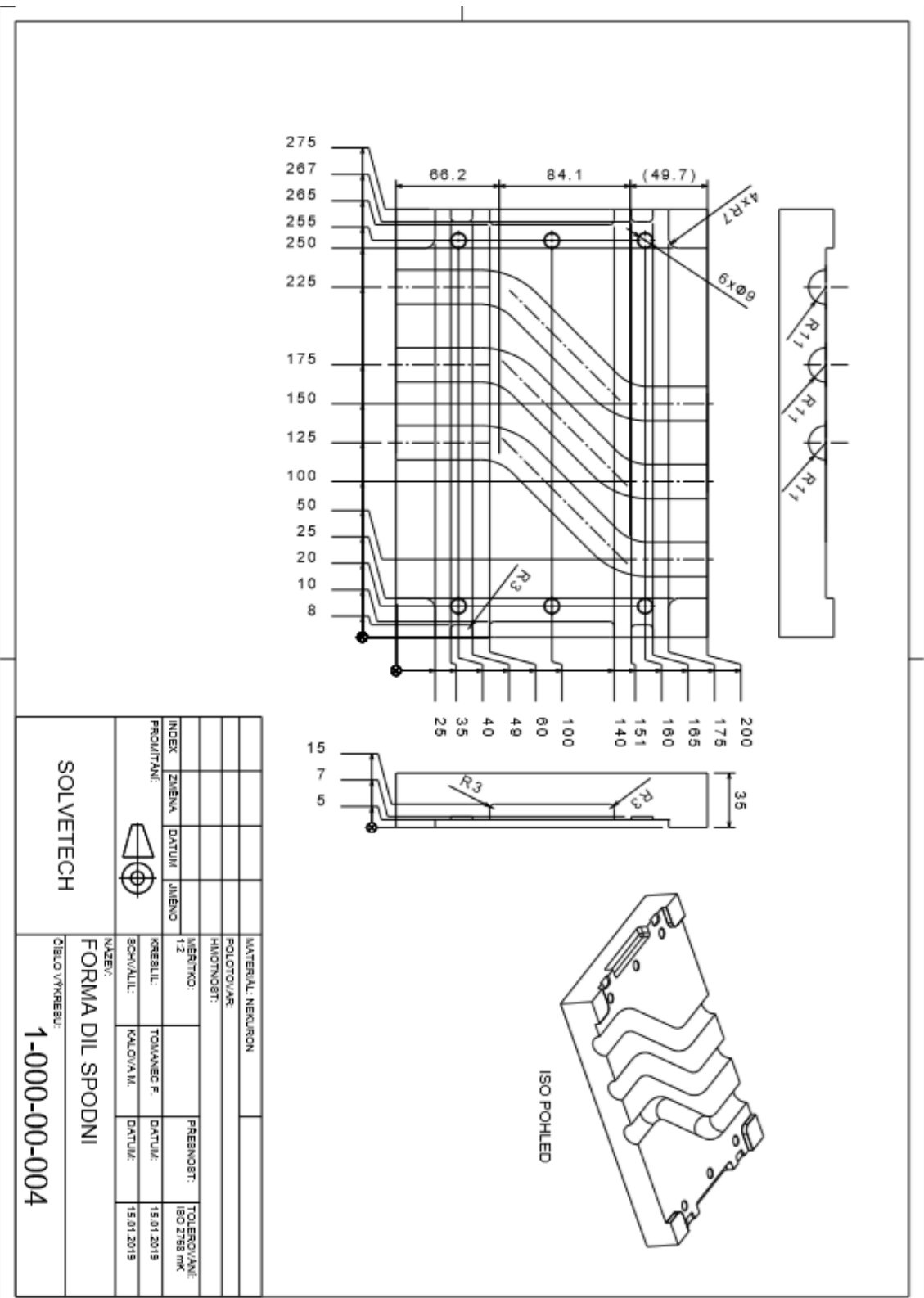


<b>Obr. 54:</b>	Tiskové struny ABS (vpravo), HIPS (vlevo).....	67
<b>Obr. 55:</b>	3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768.....	68
<b>Obr. 56:</b>	Nastavení parametrů jádra pro tisk.....	68
<b>Obr. 57:</b>	Nastavení parametrů tiskové podpory pro tisk jader. ....	69
<b>Obr. 58:</b>	Rozložení tisknutých jader na tiskové podložce (vlevo), parametry spotřeby materiálu a čas tisku (vpravo).....	69
<b>Obr. 59:</b>	Tisk podpor z HIPS. ....	70
<b>Obr. 60:</b>	Průběh tisku jader na tiskové podpory... ..	70
<b>Obr. 61:</b>	Vytisknutá ABS jádra na podporách z HIPS a tiskové podložce .....	71
<b>Obr. 62:</b>	Model formy z necuronu pro lisování kompozitních profilů.....	71
<b>Obr. 63:</b>	CNC centrum HAAS VF-2YT (vlevo) a frézování formy na tomto CNC stroji (vpravo).....	72
<b>Obr. 64:</b>	Spodní a horní díl formy.....	73
<b>Obr. 65:</b>	Uzavřená forma (vlevo), forma zajištěna šrouby (vpravo).....	73
<b>Obr. 66:</b>	Uhlíkový prepreg (vlevo) a hybridní prepreg (vpravo) na výrobu kompozitních vzorků. ....	74
<b>Obr. 67:</b>	Nástřihový plán a rozložení prepregu na jádro, A) uhlíkový prepreg, B) hybridní prepreg.. ....	75
<b>Obr. 68:</b>	Schéma nástřihového plánu a navrstvení uhlíkové tkaniny na jádro.....	81
<b>Obr. 69:</b>	Schéma nástřihového plánu a navrstvení hybridní tkaniny na jádro.. ....	81
<b>Obr. 70:</b>	Vážení suché tkaniny nutné k výpočtu množství pryskyřice.. ....	81
<b>Obr. 71:</b>	3D tiskárna Markforged X7 a její technické specifikace.....	85
<b>Obr. 72:</b>	Schéma průřezu 3D tištěného profilu. ....	85
<b>Obr. 73:</b>	Deformace ABS jader při 3D tisku.....	88
<b>Obr. 74:</b>	Delaminace a odlup tiskových ABS vrstev u 3D tištěných jader.....	88
<b>Obr. 75:</b>	Nedostatečně vytvrzený vzorek vyrobený z uhlíkového prepregu.....	88
<b>Obr. 76:</b>	Delaminace vzorků vyrobených z prepregu, uhlíkový prepreg (vlevo), hybridní prepreg (vpravo). ....	89
<b>Obr. 77:</b>	Defekt při chybném vložení vzorku do dutiny formy. ....	89
<b>Obr. 78:</b>	Pracovní prostředí softwaru trhacího stroje Zvick/Roell Z150... ..	91
<b>Obr. 79:</b>	Zkouška na vzpěr ručně vyrobených kompozitních profilů; tlakové zatížení uhlíkového kompozitu (vlevo), zatížení hybridního kompozitu (vpravo).....	92

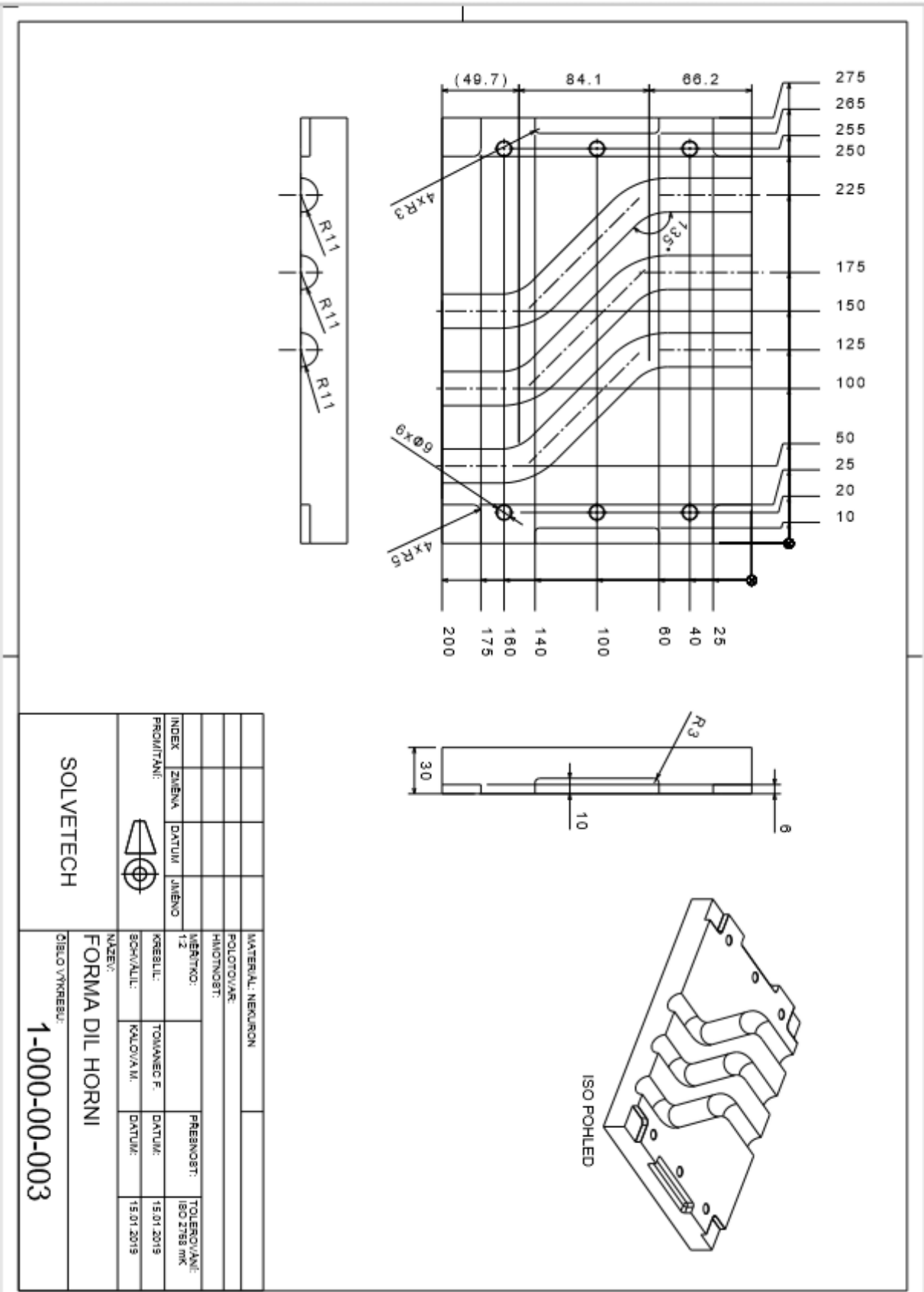
<b>Obr. 80:</b>	Zkouška na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených 3D tiskem.....	92
<b>Obr. 81:</b>	Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených ruční laminací.....	93
<b>Obr. 82:</b>	Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr hybridních profilů vyrobených ruční laminací.....	94
<b>Obr. 83:</b>	Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených lisováním prepregu.. .....	94
<b>Obr. 84:</b>	Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr hybridních profilů vyrobených lisováním prepregu... .....	95
<b>Obr. 85:</b>	Grafické vyhodnocení zkoušky na vzpěr uhlíkových profilů vyrobených pomocí 3D tisku.....	95
<b>Obr. 86:</b>	Model profilu před analýzou pomocí MKP .....	98
<b>Obr. 87:</b>	Analýza MKP uhlíkového profilu vyrobeného ruční laminací.....	99
<b>Obr. 88:</b>	Analýza MKP hybridního profilu vyrobeného ruční laminací.. .....	100
<b>Obr. 89:</b>	Analýza MKP uhlíkového profilu vyrobeného technologií PCM.. .....	100
<b>Obr. 90:</b>	Analýza MKP hybridního profilu vyrobeného technologií PCM.....	101
<b>Obr. 91:</b>	Graf srovnání výsledků kritické síly vzpěru dutých kompozitních profilů. ....	102
<b>Obr. 92:</b>	Příprava vzorků pro rozbor mikrostruktury.....	103
<b>Obr. 93:</b>	Mikrostruktura profilu z hybridního prepregu-PCM.....	104
<b>Obr. 94:</b>	Mikrostruktura profilu z hybridní tkaniny-ruční laminace... .....	105
<b>Obr. 95:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkové tkaniny-ruční laminace... .....	105
<b>Obr. 96:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkového prepregu-PCM.... .....	106
<b>Obr. 97:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkových vláken v onyxu-3D tisk.....	107
<b>Obr. 98:</b>	Mikrostruktura profilu z hybridního prepregu-PCM.....	108
<b>Obr. 99:</b>	Mikrostruktura profilu z hybridní tkaniny-ruční laminace... .....	108
<b>Obr. 100:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkové tkaniny-ruční laminace. ....	109
<b>Obr. 101:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkového prepregu-PCM. ....	109
<b>Obr. 102:</b>	Mikrostruktura profilu z uhlíkových vláken v onyxu-3D tisk. Nedeforovaný vzorek (vlevo), deformovaný vzorek (vpravo).....	110
<b>Obr. 103:</b>	Graf porovnání ceny materiálu pro 1 prototyp vyrobený konkrétní technologií; (RL-ruční laminace, PCM-lisování prepregů, 3D-3D tisk)... .....	114

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1: Spodní díl formy.



PŘÍLOHA 2: Horní díl formy.



## PŘÍLOHA 3: Necuron 651

### NECURON 651

**Deskový a blokový materiál, strojově lehce a rychle opracovatelný pro všeobecné modelářství**

<b>Oblasti použití:</b> (Hlavní)	Prototypové a kopírovací modely Navrhářské modely Pracovní modely	
<b>Barva:</b>	Hnědá	
<b>Technická data:</b>	Koeficient tepelné roztažnost (ISO 75): ca. $52 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ Teplotní odolnost: ca. 70 °C Tvrdost Shore D (ISO 868): ca. 67 Pevnost v tlaku (ISO 604): ca. 26 N/mm <sup>2</sup> Pevnost v ohybu (ISO 178): ca. 30 N/mm <sup>2</sup> Měrná hmotnost: ca. 0,70 g/cm <sup>3</sup> <ul style="list-style-type: none"><li>• neobsahuje žádné halogeny, změkčovadla nebo rozpouštědla</li><li>• vyrobeno bez přísad znečišťujících vodu</li><li>• fyziologicky bez podezření</li></ul>	
<b>Rozměry:</b> (Standard)	1 500 x 500 x 50 1 500 x 500 x 75 1 500 x 500 x 100 1 500 x 500 x 130 1 500 x 500 x 150	1 200 x 500 x 130 1 200 x 500 x 150  Povrchy rovnoběžně opracovány, jiné rozměry na zakázku
<b>Zpracování:</b>	Lepidlo: <b>NECURON® K6</b> nebo <b>NECURON® K8</b> nebo v modelářství obvyklá lepidla/pryskyřice nebo tmely  Tmel: <b>NECURON® S6</b> Přelakování: běžnými spreji nebo pryskyřicemi	
<b>Nástroje:</b>	Nástroje pro zpracování dřeva nebo kovu	

### NECURON 651

- neobsahuje žádná plnidla, která uvolňují při broušení nebezpečný prach. Obsah prachu ve vzduchu by přesto neměl překročit 6 mg/m<sup>3</sup>. Při zpracování by měla být dodržována ochranná opatření, doporučena profesní skupinou chemického průmyslu.

- ve vytvrzeném stavu není žádná nebezpečná látka ve smyslu nařízení o nebezpečných látkách. Její odpady je možno spalovat ve vhodném povoleném zařízení nebo přivážet na povolenou skládku za dodržení zákonných předpisů

- technické údaje a doporučení se vztahují na současný platný stav techniky a zakládají se na naší dlouholeté zkušenosti. Vyhrazujeme si další vývoj a vylepšování. Na základě mnohostrannosti v možnostech zpracování doporučujeme vlastní odzkoušení k dosažení optimálních výsledků.

**PŘÍLOHA 4: Technický list uhlíkového prepregu Carbon fabric GG 160 P a epoxidové pryskyřice IMP503Z.**

**TECHNICAL  
DATA SHEET**



**GRM Systems Ref.:**

**Carbon fabric GG 160 P**

<b>Mass per unit area (g/m<sup>2</sup>)</b>	160 ±5%	ISO 4605
<b>Weave</b>	plain	ISO 2113
<b>Standard width (mm)</b>	1000/1200 ±2,5%	
<b>Laminate thickness (mm)</b>	0,16 ±2,5%	(**)
<b>Other information</b>	Loomstate	

(\*\*) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Nominal construction		WARP		WEFT	
Fibre description		HR carbon fiber 3K - 200 tex		HR carbon fiber 3K - 200 tex	
Thread Count	ends/cm.	4.0	ISO 4602	4.0	ISO 4602
Weight distribution	gr/sqm.	3K carbon fibre: 80		3K carbon fibre: 80	
	%	50 %		50 %	

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risks and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.



Technologická 28  
779 00 Olomouc

www.grm-systems.cz  
info@grm-systems.cz

T +420 585 431 734  
F +420 585 431 994

## PŘÍLOHA 5: Technický list epoxidové pryskyřice IMP503Z.



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 [www.impregnatex.it](http://www.impregnatex.it)

### MATRIX PRODUCT DATA

### IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

### DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepegging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

### BENEFITS AND FEATURES

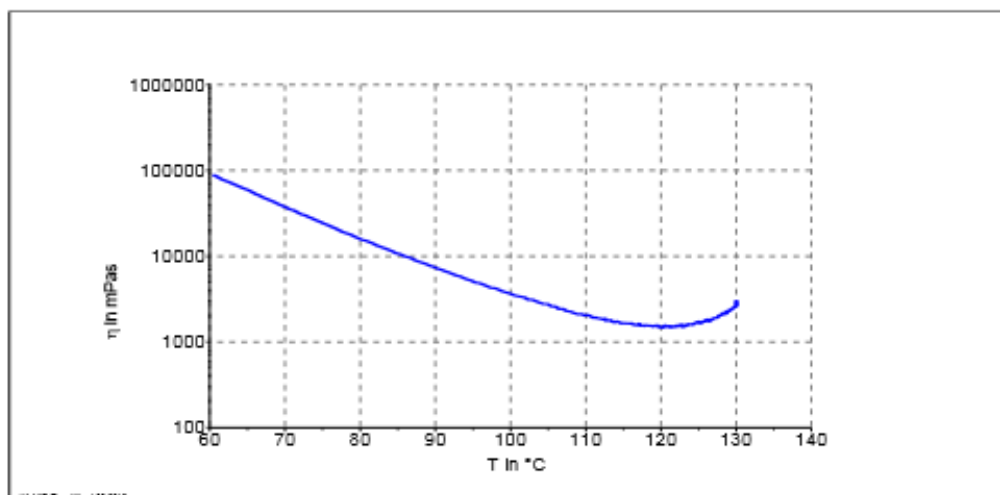
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

### RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm <sup>3</sup>	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	8'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 28
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

### VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off.  
Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



### CURING CYCLES SUGGESTED

TEMPERATURES	TIME	Tg ( TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

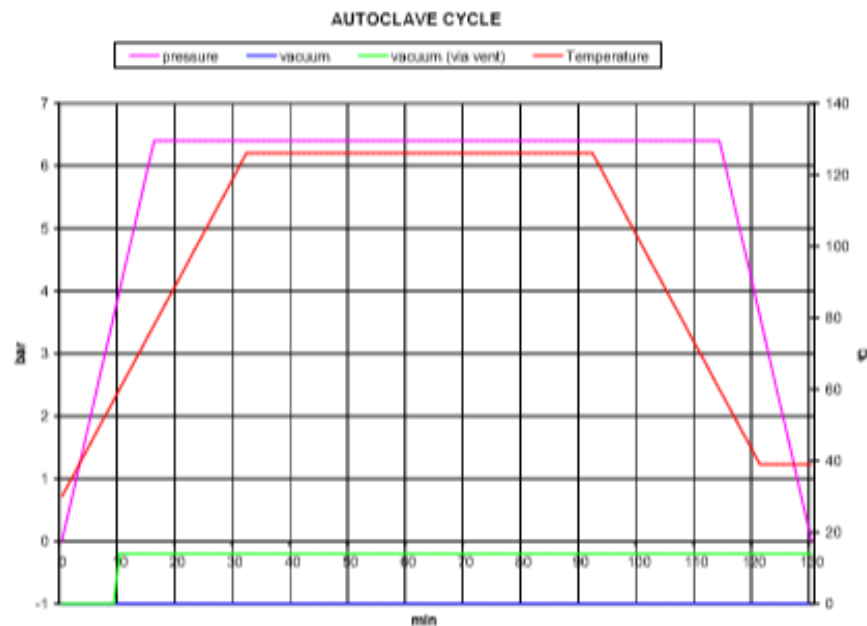


## PROCESS DESCRIPTIONS

## Autoclave:

## 125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4÷7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 80°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave



## Hot Press:

## 125°C cycle:


1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

*These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregmatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.*

## PŘÍLOHA 6: Technický list hybridního prepregu SIGRAPREG H W170-PL1/1-E320/45%

**Broad Base. Best Solutions.**



**SIGRAPREG® H W170-PL1/1-E320/45%**  
*Epoxy woven hybrid fabric prepreg*


**Material data**

Properties	Units	Values
Prepreg areal weight	g/m <sup>2</sup>	309
Fiber areal weight	g/m <sup>2</sup>	170
Width	mm	1250
Resin type		Epoxy E320
Resin mass content	%	45
Weave		Plain
Fiber type		Carbon-aramid fiber

**Delivery form**

Properties	Units	Values
Packaging		Prepreg on cardboard tube with 1330x152x10 mm Rolls packed in PE-film
Roll length	lm	50

\* registered trademarks of SGL CARBON SE  
This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should therefore not be construed as guaranteeing specific properties of the products described or their suitability for a particular application. Any existing industrial property rights must be observed. The quality of our products is guaranteed under our "General Conditions of Sale".

**Composites – Fibers and Materials**  
Sales Europe | SGL TECHNOLOGIES GmbH | [cfm-europe@sglgroup.com](mailto:cfm-europe@sglgroup.com)  
Sales Americas | SGL CARBON FIBERS LLC | [cfm-americas@sglgroup.com](mailto:cfm-americas@sglgroup.com)  
Sales Asia/Pacific | SGL CARBON Far East Ltd. | [cfm-asia@sglgroup.com](mailto:cfm-asia@sglgroup.com)  
[www.carbonfibers.com](http://www.carbonfibers.com)

## PŘÍLOHA 7: Technický list uhlíkové tkaniny CC 160 P-



### Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0044101**

Material Code: TOR000501  
 Material Designation: **CC 160 P - 100**  
 Manufacturing Date: 5.3.2014  
 Article no.: CA0005-641-0001  
 Test roll No.: C0044101  
 Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex  
 Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex  
 Compatibility: Epoxi resin  
 Binding: plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000501						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 406	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 400	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,3	0,26	0,34	* 0,30	DIN EN 5084
Area weight	g/m <sup>2</sup>	160	155	170	160	DIN EN 12127
Width	cm	100	99,5	100,5	* 99,8	DIN EN 1773
Density	g/cm <sup>3</sup>	1,76				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00441						



Address of Manufacturer:

KORDÁRNA Plus a.s.  
 696 74 Velká nad Veličkou 890  
 Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528  
 + 420 518 329 302, kucera.j@kordarna.cz

## PŘÍLOHA 8: Technický list hybridní tkaniny CA 164 P-100.



### Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0060101**

Material Code: TOR003201  
 Material Designation: **CA 164 P - 100**  
 Manufacturing Date: 24.5.2014  
 Article no.: CA0032-641-0001  
 Test roll No.: C0060101  
 Finish: loomstate

Kind of material - warp: TOR 3K 200tex+Twaron 2200 121tex (2:1)  
 Kind of material - weft: TOR 3K 200tex+Twaron 2200 121tex (1:2)  
 Compatibility: Epoxi resin  
 Binding: plain  
 Kind of material: hybrid fabric

Results of specific tests according to Specification No.:					TOR003201	
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp1	n/m	334	331	339	* 340	DIN EN 1049-2
Sett of warp2	n/m	166	164	171	* 170	DIN EN 1049-2
Sett of weft1	n/m	166	164	171	* 170	DIN EN 1049-2
Sett of weft2	n/m	334	331	339	* 340	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,32	0,3	0,35	* 0.31	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	164	159	174	168	DIN EN 12127
Width	cm	100	99,5	101	* 100.1	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				
Density TWA 2200 121 tex	g/cm3	1,44				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00601						



Address of Manufacturer:  
 KORDARNA Plus a.s.  
 696 74 Velká nad Veličkou 890  
 Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528  
 + 420 518 329 302, kucera.j@kordarna.cz

## PŘÍLOHA 9: Technický list uhlíkových vláken a onyxové matrice pro 3D tisk.

### MATERIAL DATASHEET



# Composites

Plastic Matrix	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Nylon W	<p>Dimensions and Construction of Plastic Test Specimens:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tensile test specimens: ASTM D638 type IV beams</li> <li>Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)</li> <li>Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)</li> </ul> <p>All Markforged composite machines are equipped to print Onyx. Nylon White is available on the Mark Two and X7. Onyx FR is available on X3, X5, and X7.</p> <p>Markforged parts are primarily composed of plastic matrix. Users may add one type of fiber reinforcement in each part, enhancing its material properties.</p> <p>1. Measured by a method similar to ASTM D790. Thermoplastic-only parts do not break before end of flexural test.</p> <p>2. Onyx FR at a thickness of 3mm achieves UL94 V-0 rating from a third-party lab.</p>
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4	1.3	1.7	
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36	29	51	
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25	33	4.5	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30	31	36	
Tensile Strain at Break (%)	D638	58	58	150	
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	81	79	50	
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	3.6	4.0	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	41	
Flame Resistance	UL94	—	V-0 <sup>2</sup>	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	110	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.2	1.2	1.1	
Fiber Reinforcement	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 <sup>1</sup>	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 <sup>1</sup>	51	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 <sup>1</sup>	1.2	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140	192
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600	3100
Density (g/cm <sup>3</sup> )	—	1.4	1.2	1.5	1.5

#### Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

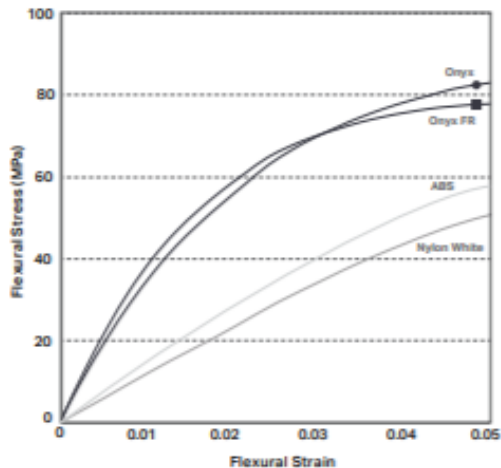
This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement, and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

# Composites

Markforged composite printers use a base plastic matrix reinforced with continuous fibers. Combining the materials during printing yields composite parts far stronger, stiffer, and more robust than conventional 3D printed plastics.

## Plastic Matrix

In Fused Filament Fabrication (FFF), a printer heats thermoplastic filament to near melting point and extrudes it through its nozzle, building a plastic matrix layer by layer. Plastics can be reinforced by any one type of fiber.



### ● Onyx Flexural Strength: 81 MPa

Onyx is a chopped carbon fiber reinforced nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

### ■ Onyx FR Flexural Strength: 79 MPa

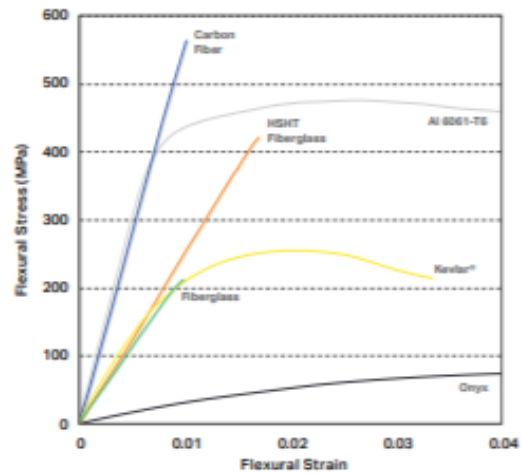
Onyx FR achieves V-0 rating on the UL94 flammability test while possessing similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

### ● Nylon White Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

## Fiber Reinforcement

Continuous Filament Fabrication (CFF) is proprietary technology that reinforces plastic printed parts with continuous fibers on each layer of a part. Users can control the layers reinforced, amount, orientation, and type of reinforcing fiber.



### ● Carbon Fiber Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

### ● Fiberglass Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

### ● Kevlar® Flexural Strength: 240 MPa

Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

### ● HSHT Fiberglass Flexural Strength: 420 MPa

High Strength High Temperature (HSHT) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.

---

## LITERATURA

- [1] KALOVÁ, M. *Rozbor mikrostruktury a mechanických vlastností kompozitů s uhlíkovými vlákny*. Bakalářská práce, VŠB-TU Ostrava, 2013.
- [2] KALOVÁ, M. *Srovnání mechanických vlastností jednodruhových vláknových a hybridních kompozitů*. Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, 2015.
- [3] HAVEL-COMPOSITE. *Technologie, jejich popis a schemata*. Havel-composites.com [online]. 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com>
- [4] JANOVEC, J., J. CEJP aj. STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [5] CALLISTER, W. D. a D. G. RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-41997-7.
- [6] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002, 392 s. ISBN 80-7224-568-3.
- [7] VALÁŠEK, P. a M. MÜLLER. *Polymeric particle composites with filler saturated matrix*. In: Manufacturing Technology, 2014. Vol 12, No 33.
- [8] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] LIPTÁKOVÁ, T. *Polymérné konštrukčné materiály*. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012. ISBN 978-80-554-0505-6.
- [10] MRAZOVÁ, M. *Advanced composite materials of the future in aerospace industry*. INCAS BULLETIN. 5(3), 139-150 2013 [cit. 2019-11-25]. DOI: 10.13111/2066-8201.2013.5.3.14.
- [11] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity: Technologie* [online]. [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>.
- [12] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály-druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [13] VOJTĚCH, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [14] VAZQUEZ, A., M. AMBRUSTOLO, S. M. MOSCHIAR, M.M. REBOREDO a J. F. GÉRARD. *Interphase modification in unidirectional glass-fiber epoxy composites*. Composites Science and Technology. 1998, 58(3-4), 549-558. DOI: 10.1016/S0266-3538(97)00172-3.

- [15] ČECH, V. *New Progress in Composite Interphase: A use of Plasma Technologies. Composites for the Millennium*. Elsevier, 2000, 246-252. DOI: 10.1533/9780857093134.246.
- [16] STRONG, A. B. *Fundamentals of composites manufacturing*. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 620 p, 2008. ISBN 0-978-087263-854-5.
- [17] ALTIMA-BOHEMIA. *Vlastnosti kompozitních materiálů* [online]. 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.altimabohemia.cz/vlastnosti-kompozitnich-materialu.html>
- [18] MALLICK, P. K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [19] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. SNTL, 1988. Praha, 328 s.
- [20] ABOUELLEIL, H., N. PRADELLE, C. VILLAT, N. ATTIK, P. COLON a B. GROSGOGÉAT. *Comparison of mechanical properties of a new fiber reinforced composite and bulk filling composites. Restorative Dentistry & Endodontics*. 2015, 40(4). DOI: 10.5395/rde.2015.40.4.262.21
- [21] GUPTA, K. M. *Engineering materials*. CRC Press, 2015. New York, 595 p. ISBN 978-1-4822-5797-7.
- [22] HEXCEL. *Prepreg Technology* [online]. 2005 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://hexcel.com/Resources/DataSheets/BrochureDataSheets/Prepreg Technology.pdf>
- [23] ALIBABA.COM. *E-glass Fabric* [online]. 2019 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: [https://www.alibaba.com/product-detail/E-glass-fabric\\_255713845.html](https://www.alibaba.com/product-detail/E-glass-fabric_255713845.html)
- [24] KRETSIS, G. *A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of hybrid fibre-reinforced plastics*. Composites, 1998. Vol. 18, No. 1, 13–23 pp.
- [25] SWOLFS, Y., L. GORBATIKH a I. VERPOEST. *Fibre hybridisation in polymer composites: A review*. Composites: Part a., 2014. 67(14), 181–200 pp.
- [26] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [27] NIVITEX.COM. *Woven Roving* [online]. 2019 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <http://www.nivitex.com/woven-roving.html>
- [28] AZO MATERIALS. *Composite prepregs-manufacturing, benefits and applications* [online]. 2019 [cit. 2019-07-16]. Dostupné z: <http://www.azom.com>
- [29] GUIDE TO COMPOSITES. *Delivering The Future of Composite Solutions* [online]. 2019 [cit. 2019-08-12]. Dostupné z: <http://www.gurit.com>.



- [30] TATHE, A., M. GHODKE, a A. P. NIKALJE. *Brief review on biomaterials and their applications*. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 2010. Vol. 2, No. 4, 19-23 pp. ISSN 0975-1491.
- [31] SUCHÝ, T. *Kompozitní materiály v medicíně* [online]. 2019 [cit. 2019-08-15]. Dostupné z: [http://www.csm-kompozity.wz.cz/tomas\\_suchy\\_kompozity.pdf](http://www.csm-kompozity.wz.cz/tomas_suchy_kompozity.pdf)
- [32] PARK, J. B. a J. D. BROZINO. *Biomaterials Principles and Applications*. CRC Press, 2003.
- [33] COMPOSITESUK. *Medical application for composite materials* [online]. 2019 [cit. 2019-08-15]. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/medical>
- [34] FYZIOKLINIKA. *Tříštvá zlomenina kosti-fyzioterapie po zlomenině se zevním fixátorem*. [online]. 2019 [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: <https://fyzioklinika.cz/clanky-o-zdravi/tristiva-zlomenina-kosti-fyzioterapie-po-zlomenine-se-zevnim-fixátorem/199-tristiva-zlomenina-kosti-fyzioterapie-po-zlomenine-se-zevnim-fixátorem>
- [35] POKORNÝ, D. *Polyetheretherketon (PEEK) - II. část: Poznatky o využití v klinické praxi*. Acta Chirurgiae Orthopaedicae et Čechosl., 2016. Vol.77, 470-478 pp.
- [36] KALVACH, Z. *Geriatrické syndromy a geriatrický pacient*. Praha: Grada, 2008. ISBN 9788024724904.
- [37] BOUGHERARA, H. *Design of a biomimetic polymer-composite hip prosthesis*. 2007.
- [38] SUSSMAN, M., D. J. R. Gage, M. H. Schwartz, S. E. Koop, T. F. Novacheck. *The identification and treatment of gait problems in cerebral palsy*. Journal of Children's Orthopaedics. 2010, 4(2), 177-178. DOI: 10.1007/s11832-010-0244-z.
- [39] DUNGL, P. *Ortopedie. 2., přeprac. a dopl. vyd.* Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-4357-8.
- [40] RAGNARSSON, K.T. *Lower extremity orthotics, shoes and gait aids*. In DeLisa, J.A., Gans, B.M. & Walsch, N.E., *Physical Medicine and Rehabilitation: Principles and Practice*. 4th.ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2005, 1377-1393 pp. ISBN 0-7817-4130-0.
- [41] ZDRAVÍ ONLINE. *Chodítka pro invalidy* [online]. 2019 [cit. 2019-09-20]. Dostupné z: <https://www.zdravionline.cz/o/Choditka-pro-invalidy>
- [42] DMA: *Kompenzační pomůcky* [online]. 2019 [cit. 2019-09-20]. Dostupné z: <http://www.dmapraha.cz/katalog>
- [43] KOMPENDIUM. *Ortotika protetika* [online]. 2019 [cit. 2019-09-22]. Dostupné z: <http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/rhbengn/ortotika.php>

- [44] VÁGNEROVÁ, M. *Psychopatologie pro pomáhající profese*. Vyd. 3., rozš. a přeprac. Praha: Portál, 2004. ISBN 80-7178-802-3.
- [45] ORTOKOMPLET. *Dolné končatiny* [online]. 2019 [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: <http://www.ortokomplet.sk/protezy/dolne-koncatiny>
- [46] NEOPROT. *Protézy dolných končatin* [online]. 2019 [cit. 2019-09-20]. Dostupné z: [http://www.neoprot.sk/protezy/protezy\\_dolnych\\_koncatin](http://www.neoprot.sk/protezy/protezy_dolnych_koncatin)
- [47] BENDOVIÁ, P., K. JEŘÁBKOVÁ a V. RŮŽIČKOVÁ. *Kompenzační pomůcky pro osoby se specifickými potřebami*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2006. ISBN 80-244-1436-8.
- [48] RENOTIÉROVÁ, M. a L. LUDKOVÁ. *Speciální pedagogika, 4. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2006. ISBN 80-244-1475-9.
- [49] PROTETIKAFM: *Ortopedická protetika* [online]. 2019 [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: <http://www.protetikafm.cz/>
- [50] SHIGLEY, J. E., Ch. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [51] PATIL, P. *Applications of composite materials in the Automobile industry* [online]. 2010 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/32475280/>
- [52] KUČERA, J. *Stručná historie CAD/CAM až po současnost* [online]. 2002 [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: [http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2002/xkubin2\\_CAD-CAM.htm](http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2002/xkubin2_CAD-CAM.htm).
- [53] KRPAL, J. *Studium využití programu Catia pro tvorbu vstřikovacích forem*. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, 2012.
- [54] WIKIPEDIE. *Metoda konečných prvků* [online]. 2019 [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)
- [55] NAVEEN, J., M. JAWAID, A. VASANTHANATHAN a M. CHANDRASEKAR. *Finite element analysis of natural fiber-reinforced polymer composites*. Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. Elsevier, 2019, 153-170 [cit. 2019-12-09]. DOI: 10.1016/B978-0-08-102289-4.00009-6.
- [56] GAO, J., X. YANG, L. HUANG a Y. SUO. *Experimental study on mechanical properties of aramid fibres reinforced natural rubber/SBR composite for large deformation – quasi-static mechanical properties*. Plastics, Rubber and Composites. 2018, 47(9), 381-390 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.1080/14658011.2018.1514480
- [57] POTLURI, R, V. DIWAKAR, K. VENKATESH a B. S. REDDY. *Analytical Model Application for Prediction of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced*

- Composites. Materials Today: Proceedings* [online]. 2018, 5(2), 5809-5818 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.12.178.
- [58] ELMARAKBI, A. *Multiscale modelling of hybrid glass fibres reinforced graphene platelets polyamide PA6 matrix composites for crashworthiness applications*. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2017. *Applied Materials Today* 6, 1–8 pp.
- [59] TRZEPIECINSKI, T. *Modelling of multilayer actuator layers by homogenisation technique using Digimat software*. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2017. *Ceramics International*, Vol. 43, 3259–3266 pp.
- [60] VÁLEK, L. *Modelování plněných kompozitních systémů*. Diplomová práce. UTB Zlín. 2016.
- [61] MOURITZ A., M. BANNISTER, P. FALZON, K. LEONG. *Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites*. *Composites. Part A*, 2015, 1444-1461 pp.
- [62] DOITRAND, A., C. FAGIANO, V. CHIARUTTINI, F.H. LEROY, A. MAVEL a M. HIRSEKORN. *Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven polymer matrix composites under quasi-static tensile loading*. *Composites Science and Technology*. 2015, 119, 1-11 [cit. 2019-12-06]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.09.015.
- [63] LIU, Ch., J. XIE, Y. SUN a L. CHEN. *Micro-scale modeling of textile composites based on the virtual fiber embedded models*. *Composite Structures*. 2019, 230 [cit. 2019-12-08]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111552.
- [64] LIU, Z. a Y. XIA. *Development of a numerical material model for axial crushing mechanical characterization of woven CFRP composites*. *Composite Structures*. 2019, 230 [cit. 2019-12-09]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111531.
- [65] ISO/ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing - General principles - Terminology*.
- [66] EVANS, B. *Practical 3D printers*. New York. Springer Science+Business Media, 2012. *Technology in action*. ISBN 14-302-4392-9.
- [67] LEVY, G. N., R. SCHINDEL a J.P. KRUTH. *Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives*. *CIRP Annals*. 2003, 52(2), 589-609 [cit. 2019-08-28]. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60206-6.
- [68] PALOÚŠEK, D. *3D optická digitalizace a rapid prototyping v ortotice a protetice: 3D optical digitizing and rapid prototyping in orthotics and prosthetics*. Zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIUUM, 2014. ISBN 9788021448490.

- [69] MATERIALISE.COM. *Manufacturing*. [online]. 2019 [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy>
- [70] CHUA, Ch. K. a K. F. LEONG. *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles And Applications*. 5.ed. of Rapid Prototyping. Singapore: World Scientific Publishing, 2017. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [71] SOOD, A. K., R.K. OHDAR a S.S. MAHAPATRA. *Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts*. Materials & Design. 2010, 31(1), 287-295 [cit. 2019-10-28]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
- [72] STRATASYS. *Support Center* [online]. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/uprint-se-plus>
- [73] BUDDING, A., T.H.J. VANEKER a A.J.A. WINNUST. *Open Source Powder based Rapid Prototyping Machine for Ceramics*. Procedia CIRP. 2013, 6, 533-538 [cit. 2019-10-28]. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.101.
- [74] INVENTOR-BLOG. *FDM technologie* [online]. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/uprint-se-plus>
- [75] PARANDOUSH, P. a D. LIN. *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. Composite Structures. 2017, 182, 36-53 [cit. 2019-11-02]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.
- [76] WANG, X., M. JIANG, Z. ZHOU, J. GOU a D. HUI. *3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective*. Composites Part B: Engineering. 2017, 110, 442-458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [77] MURPHY, S. V. a A. ATALA. *3D bioprinting of tissues and organs*. Nature Biotechnology. 2014, 32(8), 773-785. DOI: 10.1038/nbt.2958.
- [78] GATE2BIOTECH. *Bioinkousty pro 3D tisk orgánů* [online]. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.gate2biotech.cz/bioinkousty-pro-3d-tisk-organu/>
- [79] HUANG, Y., X. F. ZHANG, G. GAO, T. YONEZAWA a X. CUI. *3D bioprinting and the current applications in tissue engineering*. Biotechnology Journal. 2017, 12(8). DOI: 10.1002/biot.201600734.
- [80] BAKARICH, S. E., R. GORKIN, M. IN HET PANHUIS a G. M. SPINKS. *Three-Dimensional Printing Fiber Reinforced Hydrogel Composites*. ACS Applied Materials & Interfaces. 2014, 6(18), 15998-16006. DOI: 10.1021/am503878d
- [81] MANNOOR, M. S., Z. JIANG, T. JAMES. *3D Printed Bionic Ears*. Nano Letters. 2013, 13(6), 2634-2639. DOI: 10.1021/nl4007744.

- [82] LEE, A., A. R. HUDSON, D. J. SHIWARSKI. *3D bioprinting of collagen to rebuild components of the human heart*. Science. 2019, 365(6452), 482-487. DOI: 10.1126/science.aav9051.
- [83] KONSTRUKTÉR.CZ. *3D tisk* [online]. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/student-z-vut-v-brne-vyrobil-proteticke-oko-3d-tiskem/>
- [84] BIOMEDICAL ENGINEERING. *Medical Devices by Addictive Manufacturing* [online]. 2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.biomedicalengineering.sk/?lang=sk>
- [85] CAD.CZ. *Možnosti 3D tisku v medicíně dnes a v budoucnu* [online]. 2019 [cit. 2019-12-18]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/home/cadnews/4963-moznosti-3d-tisku-v-medicine-dnes-a-v-budoucnu-jan-skopik-aroja-3dfactories.html>
- [86] HAVEL-COMPOSITES. *Tkaniny* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/shop/44-P%C5%98%C3%8DZOV%C3%89-TKANINY-Klasicke/0-list.html>
- [87] PULTREX. *Pultrusion Applications* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://pultrex.com/pultrusion-applications/>
- [88] PULTREX. *Pultrusion Products* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://pultrex.com/>
- [89] STARR, Trevor F. *Pultrusion for Engineers*. Boca Raton: CRC Press, 2000, 303 s. ISBN 08493-0843-7.
- [90] HEBEI MAPLE FIBERGLASS. *FRP Machining* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.frpmachining.com/faqs/frpgrp-pipe-filament-winding-machine>
- [91] ALNEX. *Composites Technologies* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.allnex.com/en/technologies/composites>
- [92] WULFSBERG, J., A. HERRMANN, G. ZIEGMANN, G. LONSDORFER, N. STÖß a M. FETTE. *Combination of Carbon Fibre Sheet Moulding Compound and Prepreg Compression Moulding in Aerospace Industry*. Procedia Engineering. 2014, 81, 1601-1607 [cit. 2019-11-04]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.197.
- [93] PILULKA.CZ. *Duralová čtyřbodová hůl* [online]. 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.pilulka.cz/474-duralova-hul-ctyrbodova>
- [94] STRÁŽNICKÝ, P. *Vícebodová ortopedická hůl*. Rešerše na stav techniky, UTB, Zlín, 2018.
- [95] PINSHAPE BLOG. *3D Filament Guide* [online]. 2017 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/popular-3d-printing-filaments-3d-printer-filament-types/>

- [96] MATTER HACKERS. *3D Printer Filament Comparison Guide kompozitů* [online]. 2020 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [97] PRUSA. *Průvodce materiály* [online]. 2020 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy>
- [98] PROTOLAB. *3D tisk kompozitů* [online]. 2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz>
- [98] STRATASYS. *Dimension 768/Elite 3D Printer*, [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z [https://cdn.hackaday.io/files/10782461297088/768\\_Elite\\_Service\\_Guide.pdf](https://cdn.hackaday.io/files/10782461297088/768_Elite_Service_Guide.pdf)
- [100] OPETECH. *Vertikální obráběcí centra* [online]. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.opetech.cz/wp-content/uploads/2019/04/vertikalni-obrabeci-cnc-centra-haas-vf.pdf>
- [101] PROTOLAB. *3D tisk kompozitů* [online]. 2019 [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://protolab.cz/3d-tisk-fdmfff/>
- [102] ŠMILAUREL, V. *Přednáška 5 – vzpěr* [online]. 2011 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: [https://mech.fsv.cvut.cz/homeworks/student/PRA/PP\\_prednaska\\_05\\_vzper.pdf](https://mech.fsv.cvut.cz/homeworks/student/PRA/PP_prednaska_05_vzper.pdf)
- [103] ZAJÍČEK, M. a V. ADÁMEK. *Vzpěr přímých prutů* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/vzper-primych-prutu/shrnuti.pdf>
- [104] RUSIŇÁK.CZ *NX CAD* [online]. [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <http://www.rusinak.cz/cz/produkty/nx-cad>

---

## Seznam publikací

1. KUBICEK, Jan, Filip TOMANEC, Martin CERNY, Dominik VILIMEK, **Martina KALOVA** a David OCZKA. *Recent Trends, Technical Concepts and Components of Computer-Assisted Orthopedic Surgery Systems: A Comprehensive Review*. Sensors [online]. 2019, **19**(23) [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.3390/s19235199. ISSN 1424-8220. (SCOPUS)
2. **KALOVA, Martina**, Sona RUSNAKOVA, Zdenek JONSTA, Filip TOMANEC a Jiri KOHUT. *Mold Design for Rings of External Fixator*. MM Science Journal [online]. 2019, 2019(01), 2739-2746 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.17973/MMSJ.2019\_03\_2018002. (SCOPUS)
3. TOMANEC, Filip, Sona RUSNAKOVA a Martina **KALOVA**. *Innovation of Ilizarov Stabilization Device with The Design Changes*. MM Science Journal [online]. 2019, 2019(01), 2732-2738 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.17973/MMSJ.2019\_03\_2018005. (SCOPUS)
4. TOMANEC, Filip, Sona RUSNAKOVA, Jiri KOHUT a **Martina KALOVA**. *Composite External Fixators: Design with Subsequent FEM Analysis Optimization*. Manufacturing Technology [online]. 2019, 19(3), 513-517 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.21062/ujep/321.2019/a/1213-2489/MT/19/3/513. (SCOPUS)
5. **KALOVA, Martina**. Prediction of Mechanical Properties of Fiber Composites for Medical Applications Den doktorandů 2018: sborník semináře: Fakulta materiálově-technologická, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2018. ISBN 978-80-248-4241-7. (sborník)
6. RUSNÁKOVÁ, S, **M KALOVÁ** a Z JONŠTA. *Overview of production of pre-preg, prototype and testing*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 448 [cit. 2020-01-05]. DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012069. (SCOPUS)

7. **KALOVA, Martina**, Soňa RUSNAKOVA. (2017). *Microstructure of Polymer Composite Material*. Manufacturing Technology, pp.722-728, Vol. 17, No.5, ISSN:1213-2489. (SCOPUS)
8. **KALOVÁ, Martina.**, Soňa RUSNAKOVA. (2017). *Mikrostruktura polymerních kompozitních materiálů*. Manufacturing technology Pilsen 2017. ISBN 978-80-261-0636-4. (sborník)
9. **KALOVA, Martina**. *Preparation and mechanical properties of hybrid composites based on carbon and aramid fibres*. Den doktorandů 2016: sborník semináře: Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-4001-7. (sborník)

## Řešené projekty-spoluřešitel

- **CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008441** Inovativní léčebné metody pohybového aparátu v úrazové chirurgii CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008441, který je podpořen v rámci Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání, výzvy číslo 02\_17\_049 - Dlouhodobá mezisektorová spolupráce pro ITI (ostravské aglomerace).
- **SP2019/43** Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství.
- **SP2019/27** Využití metod strukturní analýzy, zkoušení mechanických vlastností a nedestruktivní defektoskopie při komplexní charakterizaci pokročilých materiálů.
- **SP2018/60** Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství.
- **SP2018/70** Studium souvislostí mezi technologií výroby a zpracováním pokročilých materiálů, jejich strukturními parametry a užitnými vlastnostmi, Specifický výzkum VŠB-TUO.
- **SP2016/111** Studium vztahů mezi strukturními parametry a vlastnostmi pokročilých materiálů.